



**Filipa Cristina
Sousa Gama**

**Análise do desempenho térmico de casas
modulares pré-fabricadas**



**Filipa Cristina
Sousa Gama**

**Análise do desempenho térmico de casas modulares
pré-fabricadas**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis realizada sob a orientação científica do Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

o júri

Presidente

Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Aveiro

Arguente

Maria Fernanda da Silva Rodrigues
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de
Aveiro

Orientador

Nelson Amadeu Dias Martins
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade
de Aveiro

agradecimentos

Agradeço ao Professor Nelson Martins pela orientação e à minha família pelo apoio e compreensão.

palavras-chave

casa pré-fabricada modular, inércia, conforto térmico, eficiência energética.

resumo

A origem das casas pré-fabricadas remonta ao século XIX: o ano 1833 é considerado o ano do nascimento das estruturas pré-fabricadas, tendo surgido na Grã-Bretanha a *Portable Colonial Cottage for Emigrants*, habitação destinada aos emigrantes na Austrália. A evolução destes modelos até às atuais casas modulares, decorreu essencialmente nos Estados Unidos da América e na Europa, em países com climas temperados, existindo diversos modelos construtivos adequados a essas regiões. As casas modelares podem ser uma solução sustentável e inovadora para o alojamento de famílias, em países emergentes, situados no continente Africano, onde predomina o clima tropical. No entanto, a introdução de casas pré-fabricadas modulares nessas regiões, implica a sua adequação em termos construtivos com vista à obtenção do conforto térmico necessário para dar resposta às exigências dos climas mais quentes e húmidos. O objetivo deste trabalho é adaptar uma casa modular habitacional de pequenas dimensões, de preferência com estratégias passivas, ao clima tropical tendo-se tomado Dakar no Senegal como referência), otimizando o conforto térmico de um modelo básico utilizando o *software DesignBuilder* como ferramenta de análise. Conclui-se que o bom desempenho térmico e energético do pequeno edifício é muito favorecido pelo aumento da inércia dos elementos construtivos, situação que é incompatível com o tipo de construção modular que, pelas suas características, implica a utilização de materiais leves e portanto com inércia baixa. Assim, o melhor modelo alcançado neste estudo apresenta uma inércia térmica média e inclui materiais de mudança de fase (PCM) nos seus elementos construtivos e segue uma estratégia de ventilação mista (natural apoiada por sistemas mecânicos quando necessário)

keywords

prefabricated modular house, inertia, thermal comfort, energy efficiency

abstract

The origin of prefabricated houses dates back to the nineteenth century: 1833 is considered the birth year of prefabricated houses, having emerged in Britain "Portable Colonial Cottage for Emigrants", aimed to housing emigrants in Australia. The evolution of these models to the current modular homes, took place mainly in the United States and Europe, in countries with temperate climates, and there are many models adapted to these regions. The houses can be an exemplary sustainable and innovative solution for housing families in emerging countries, situated in Africa, where the tropical climate prevails. However, the introduction of prefabricated modular homes in these regions implies their suitability in terms of construction in order to obtain the thermal comfort needed to meet the demands of the hot and humid climates. The objective of this work is adapting a small modular house, mainly with passive strategies, to a tropical climate (Dakar in Senegal was taken as the reference clima), optimizing the thermal comfort of a basic model with the support of DesignBuilder software. It was concluded that the thermal performance and energy consumption of the considered small building is much favored by the increased inertia of the building elements, a situation that is incompatible with the type of modular construction which, by its nature, involves the use of lightweight materials and therefore with low inertia. Thus, the best model achieved in this study has a medium thermal inertia, includes phase change materials (PCM) in its constructive elements and a mix mode ventilation strategy (natural ventilation supported by mechanical means if required).

Índice geral

Índice geral	1
1. Introdução	11
1.1 Enquadramento.....	11
1.2 Objetivo do estudo.....	11
1.3 Revisão bibliográfica	12
1.3.1 Construção pré fabricada modular	12
1.3.1.1 Evolução das casas pré- fabricadas de tipo modular.....	14
1.3.1.2 Tipos de casas pré-fabricadas.....	20
1.3.1.3 Casas pré- fabricadas modulares e sustentabilidade.....	21
1.3.2 Caracterização climática e Climatização em regiões tropicais.....	22
1.3.3 Conforto térmico, importância do clima e construção bioclimática.....	23
1.3.3.1 Conforto térmico.....	23
1.3.3.2 Importância do clima.....	26
1.3.3.3 Construção bioclimática.....	28
1.3.4 Ferramentas de simulação de sistemas de climatização em edifícios	31
1.4 Contributo do trabalho	32
1.5 Estrutura da dissertação	33
2. Ecoeficiência e construção modular pré-fabricada sustentável	35
2.1 Introdução	35
2.2 Análise <i>SWOT</i>	36
2.3 Principais vantagens e desafios.....	38
2.4 Resumo e conclusões do capítulo	39
3. Construção Bioclimática: opções construtivas e integração de soluções renováveis	41
3.1 Opções construtivas e parâmetros a ajustar	41

3.1.1	Fator de forma.....	41
3.1.2	Orientação solar	43
3.1.3	Envolvente opaca	44
3.1.3.1	Integração de paredes de <i>Trombe</i>	44
3.1.4	Envolvente envidraçada	50
3.1.5	Tipos de cobertura	55
3.1.5.1	Coberturas refletantes.....	55
3.1.5.2	Coberturas ajardinadas.....	55
3.1.6	Ventilação.....	61
3.1.6.1	Arrefecimento gratuito(<i>free cooling</i>)	64
3.1.7	Recolha de água pluvial.....	67
3.1.8	Integração de soluções renováveis	71
3.1.8.1	Solar Térmico.....	71
3.1.8.2	Solar fotovoltaico	713
3.2	Resumo e conclusões do capítulo	78
4.	Otimização do comportamento térmico das casas modulares pré fabricadas em climas tropicais.....	81
4.1	Introdução.....	81
4.2	Metodologia	81
4.3	Climas tropicais	82
4.4	Perfis de utilização e cargas térmicas interiores.....	82
4.5	Definição do caso de referência em climas tropicais.....	84
4.5.1	Solução construtiva	86
4.5.2	Caracterização do comportamento térmico e de habitabilidade	88
4.5.3	Soluções de climatização avaliadas.....	89
4.5.3.1	Estimativa e caracterização de consumo energético.....	93
4.5.4	Discussão da solução proposta	97

4.6	Estudo de otimização para climas tropicais	100
4.6.1	Principais Constrangimentos.....	100
4.6.2	Estratégia de otimização	101
4.6.3	Soluções construtivas avaliadas	101
4.6.4	Estudo Paramétrico	108
4.6.4.1	Variáveis de entrada e indicadores de desempenho	108
4.6.4.2	Caracterização da solução proposta	108
4.6.4.3	Comportamento térmico e de habitabilidade	108
4.6.4.4	Discussão da solução proposta	108
4.7	Resumo e conclusões do capítulo	129
5.	Conclusões e trabalho futuro	133
5.1	Conclusões.....	133
5.2	Trabalho futuro	135
6.	Referências	137
7.	Anexos	147
7.1	Anexo I- Ilustrações do modelo caso de estudo	147
7.1	Anexo II-Materiais das diversas soluções construtivas.....	149

Índice de figuras

Figura 1- <i>Kupferhaus</i> ^[3]	15
Figura 2- <i>Dymaxion house II</i> ^[3]	15
Figura 3 - <i>Maison Tropicale</i> ^[3]	16
Figura 4 – <i>Living Box</i> ^[3]	17
Figura 5 – <i>Micro Compact Home</i> ^[3]	17
Figura 6 – <i>Black Barn</i> ^[3]	18
Figura 7 – <i>Mod House</i> ^[3]	18
Figura 8 – <i>Marmol Radziner Prefab</i> ^[3]	19
Figura 9 – <i>Livinghome Rk1</i> ^[3]	19
Figura 10 – <i>Boxhome</i> ^[3]	20
Figura 11 – <i>Easy Domes</i> ^[3]	58
Figura 12 – Plantas utilizadas em coberturas vegetais ^[69]	59
Figura 13 – Dispositivo com esferas de PCMs para armazenamento de calor latente ^[78]	65
Figura 14 - Programa micro-solar em expansão nos países Africanos ^{[89] [90]}	77
Figura 15 – Divisão dos espaços da casa modular projeto.....	84
Figura 16 - Caracterização dos elementos construtivos da cobertura da casa referência.....	86
Figura 17 – Caracterização dos elementos construtivos do pavimento da casa referência.....	86
Figura 18 - Caracterização dos elementos construtivos das paredes exteriores e interiores da casa referência.....	87
Figura 19 - Caracterização dos envidraçados da casa referência.....	87
Figura 20 – Gráficos das médias anuais de temperatura, humidade relativa e índices de conforto do interior da casa referência sem climatização.....	89
Figura 21 – Gráficos das médias anuais de temperatura, humidade relativa e índices de conforto do interior da casa referência com ventilação natural.....	92
Figura 22 - Gráficos das médias anuais de temperatura, humidade relativa e índices de conforto do interior da casa referência com climatização mecânica.....	94
Figura 23 - Consumos energéticos totais anuais na casa referência sem climatização.....	95
Figura 24 - Consumos energéticos totais anuais na casa referência com climatização.....	95
Figura 25 – Consumos energéticos anuais desagregados na casa referência sem climatização mecânica.....	96

Figura 26 – Consumos energéticos anuais desagregados na casa referência com climatização mecânica.....	97
Figura 27– Balanço térmico na casa referência climatizada, devido aos ganhos internos por equipamentos, iluminação, ocupação e ganhos solares através dos envidraçados, e arrefecimento/aquecimento sensíveis.....	98
Figura 28 – Balanço térmico devido aos fluxos de calor através dos elementos construtivos e ventilação.....	98
Figura 29 - Variação do consumo de energia para arrefecimento em função do tipo de parede exterior na casa referência.....	109
Figura 30 – Variação do consumo de energia para aquecimento em função do tipo de parede exterior na casa referência.....	109
Figura 31 - Variação do consumo total anual de energia em função do tipo de parede exterior na casa referência.....	110
Figura 32 - Variação do consumo anual de energia para arrefecimento em função do tipo de cobertura na casa referência.....	111
Figura 33 - Variação do consumo anual de energia para aquecimento em função do tipo de cobertura na casa referência.....	111
Figura 34 - Variação do consumo total anual de energia em função do tipo de cobertura na casa referência.....	112
Figura 35 - Variação do consumo anual de energia para arrefecimento em função do tipo de pavimento na casa referência.....	113
Figura 36 - Variação do consumo anual de energia para aquecimento em função do tipo de pavimento na casa referência.....	113
Figura 37 - Variação do consumo total anual de energia em função do tipo de pavimento na casa referência.....	114
Figura 38 - Variação do consumo anual de energia para arrefecimento em função do tipo de vidro e da percentagem dos envidraçados em relação à parede na casa referência.....	115
Figura 39 - Variação do consumo anual de energia para aquecimento em função do tipo de vidro e da percentagem dos envidraçados em relação à parede na casa referência.....	116
Figura 40 - Variação do consumo total anual de energia em função do tipo de vidro e da percentagem dos envidraçados em relação à parede na casa referência.....	116
Figura 41 - Consumos energéticos anuais totais na casa otimizada com climatização mecânica.....	119

Figura 42 - Consumos energéticos anuais desagregados na casa otimizada com climatização mecânica.....	120
Figura 43 - Gráficos das médias anuais de temperatura, humidade relativa e índices de conforto do interior da casa otimizada climatizada com ar condicionado.....	120
Figura 44 - Consumos energéticos anuais totais na casa otimizada com parede 5, com climatização mecânica.....	121
Figura 45 - Consumos energéticos anuais desagregados na casa otimizada com parede 5, com climatização mecânica.....	122
Figura 46 - Consumos energéticos anuais totais na casa otimizada climatizada por <i>mixed mode</i>	124
Figura 47 - Consumos energéticos anuais desagregados na casa otimizada climatizada por <i>mixed mode</i>	125
Figura 48– Balanço térmico na casa otimizada climatizada, devido aos ganhos internos por equipamentos, iluminação, ocupação e ganhos solares através dos envidraçados, e arrefecimento/aquecimento sensíveis.....	127
Figura 49 – Balanço térmico devido aos fluxos de calor através dos elementos construtivos e ventilação.....	127
Figura 50– Balanço térmico na casa climatizada otimizada com parede 5, devido aos ganhos internos por equipamentos, iluminação, ocupação e ganhos solares através dos envidraçados, e arrefecimento/aquecimento sensíveis.....	128
Figura 51 – Balanço térmico devido aos fluxos de calor através dos elementos construtivos e ventilação.....	128

Índice de tabelas

Tabela 1 – Propriedades dos materiais de mudança de fase (PCMs).....	47
Tabela 2 – Tipologias de vidros e propriedades ^[53]	51
Tabela 3 – Caixilharias para janelas e respetivos coeficientes de transmissão térmica.....	52
Tabela 4 – Tecnologias fotovoltaicas.....	74
Tabela 5 – Perfis de atividade e de iluminação nos quartos.....	83
Tabela 6 - Perfis de atividade e de iluminação na sala com cozinha comum.....	83
Tabela 7 - Perfis de atividade e de iluminação na casa de banho.....	84
Tabela 8 - Médias mensais de temperatura ambiente no exterior e da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de <i>Fanger</i> no interior da casa referência sem climatização.....	88
Tabela 9- Caracterização técnica dos equipamentos de expansão direta.....	91
Tabela 10 – Médias mensais de temperatura ambiente no exterior e da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de <i>Fanger</i> no interior da casa referência com ventilação natural.....	93
Tabela 11 - Médias mensais de temperatura ambiente no exterior e da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de <i>Fanger</i> no interior da casa referência, com climatização.....	94
Tabela 12 – Soluções construtivas avaliadas para paredes exteriores.....	103
Tabela 13- Soluções construtivas avaliadas para coberturas.....	105
Tabela 14 - Soluções construtivas avaliadas para pavimentos.....	106
Tabela 15 - Soluções construtivas avaliadas para envidraçados.....	103
Tabela 16 - Médias mensais de temperatura ambiente no exterior, da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de <i>Fanger</i> no interior da casa otimizada, sem climatização.....	118
Tabela 17 - Médias mensais de temperatura ambiente no exterior e da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de <i>Fanger</i> no interior da casa otimizada com climatização mecânica.....	119
Tabela 18 - Médias mensais de temperatura ambiente no exterior, da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de <i>Fanger</i> no interior da casa otimizada com parede 5, com climatização.....	121

Tabela 19 - Médias mensais de temperatura ambiente de bolbo seco no exterior e da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de *Fanger* no interior da casa otimizada com ventilação natural.....123

Tabela 20 - Médias mensais de temperatura ambiente de bolbo seco no exterior e da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de *Fanger* no interior da casa otimizada climatizada em *mixed mode*.....124

Lista de acrónimos

ACS - Adaptative Confort Standard;

AQS - Água quente sanitária;

ASHRAE- American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers;

AVAC – Aquecimento, Ventilação e ar condicionado;

COP - Coeficiente de performance;

DB- DesignBuilder;

DOE - USA Department of Energy;

EN - European Norm;

EUA - Estados Unidos América;

FF - Fator forma;

FV- Fotovoltaico;

LFC – Lâmpadas fluorescentes compactas;

LSF - Light Steel Framing;

PCMs - Phase change materials;

PMV - Predicted Mean Vote;

PPD - Predicted Percentage Dissatisfied;

PVC – Policloreto de vinila;

TMY - Typical Meteorological Year;

IWEC - International Weather for Energy Calculation;

SPD - Suspended Particle Device;

STC - Standard test conditions;

SHGC- Solar heat gain coeficiente.

1. Introdução

1.1 Enquadramento

A Organização das Nações Unidas publicou no *Demographic Yearbook* ^[1] estatísticas relativas ao crescimento e distribuição da população mundial, mostrando que o continente Africano é onde a evolução demográfica tende a aumentar de forma mais pronunciada, com uma taxa de crescimento anual entre 2 e 3 % em quase todos os países emergentes, considerados pobres ou muito pobres. O elevado desenvolvimento populacional em território Africano deve-se essencialmente à melhoria das condições de vida da população e consequente declínio da mortalidade ^[1]. São exemplos de países emergentes Burkina Faso, Camarões, Costa do Marfim, Guiné, Libéria, Madagáscar, Mali, Nigéria, Níger, República do Congo, Ruanda, São Tomé e Príncipe, Senegal, Serra Leoa, Togo, Uganda, Zâmbia, entre outros, com a particularidade de todos se localizarem em regiões de clima tropical equatorial e tropical de estação húmida e seca, segundo a classificação climática de *Köppen*.

De acordo com a Declaração Universal dos Direitos do Homem ^[2], os Governos têm obrigação de estipular o direito à habitação, criando condições para assegurar o acesso a lares condignos, acessíveis, em termos de custo de aquisição ou de arrendamento. Uma habitação condigna deve ser um espaço com equipamentos básicos, com privacidade, segurança, iluminação e ventilação adequadas ^[2]. Assim, as casas pré-fabricadas modulares poderão vir a ser consideradas uma solução inovadora para alojar famílias em países emergentes, desde que reúnam as devidas condições de habitabilidade, nomeadamente o conforto térmico.

1.2 Objetivo do estudo

Este trabalho tem como objetivo adaptar as soluções construtivas de uma casa pré-fabricada modular de pequenas dimensões, para fins habitacionais, ao clima tropical com chuvas de Verão, visando a obtenção de conforto térmico.

São efetuadas simulações para uma casa localizada em Dakar capital do Senegal no *software DesignBuilder versão 3.1.0.068*, que é a ferramenta de simulação dinâmica usada para projetar o

modelo construtivo. Este país tem clima tropical húmido, e a base de dados climáticos desta região está disponível no simulador.

A simulação dinâmica é um método que permite quantificar os potenciais consumos de energia num edifício, dando a conhecer as necessidades de aquecimento e arrefecimento, os ganhos internos derivados da utilização do edifício e dos seus elementos exteriores, perdas pela envolvente, desagregação de consumos, etc. Trata-se de uma ferramenta adaptada para ensaiar várias soluções de projeto.

Pretende-se projetar uma casa para ocupação permanente, com níveis de conforto térmico adequados, dando prioridade à aplicação de técnicas passivas, com o foco principal no estudo do envelope da habitação, na tentativa de encontrar elementos construtivos que conjugados, permitam obter elevados níveis de isolamento, pontes térmicas reduzidas e janelas bem isoladas, espaços com infiltrações de ar reduzidas e um sistema de ventilação eficaz, e assegurar a boa qualidade do ar interior, tentando, ao mesmo tempo, minimizar a complexidade dos sistemas. Pretende-se obter resultados satisfatórios através de sistemas com elevada eficiência energética.

1.3 Revisão bibliográfica

1.3.1 Construção pré fabricada modular

Arnt Cobbers e *Oliver Jahn*, através do livro *Prefab Houses* ^[3] ilustram como as casas pré-fabricadas evoluíram até às casas modulares. Arquitetos projetaram casas versáteis com modelos de formato invulgar, usando muitas vezes materiais pouco comuns. Materiais como madeira, aço, combinação de ambos e alumínio são os que sobressaem nas casas que foram alvo de estudo por *Cobbers* e *Jahn*. Bastante evidente no livro em referência é a abordagem às questões energéticas e do conforto térmico nestas habitações, que realça a preocupação dos criadores em tentar obter, desde muito cedo, casas acolhedoras. A evolução tecnológica destes modelos demonstra o trabalho desenvolvido ao longo dos tempos com vista à obtenção de casas confortáveis de baixo consumo energético, aliadas a um elevado nível de funcionalidade, habitabilidade e sustentabilidade.

No entanto, a maioria destas casas foram concebidas para climas temperados, pelo que se considera que a introdução dos modelos mais comuns de casas pré-fabricadas modulares em regiões com climas quentes e mais agressivos, necessita de adaptações para se conseguirem obter condições de conforto térmico ^[4]. Efetivamente as casas pré-fabricadas são maioritariamente construções leves, e podem ser caracterizadas por uma baixa inércia térmica, um fator negativo para a sua utilização em territórios com temperaturas habitualmente elevadas, podendo ocorrer situações de sobreaquecimento, sendo necessários consumos elevados de energia para se atingirem os níveis de conforto.

Jean Prouvé foi o grande propulsor de casas pré-fabricadas tropicais, tendo criado a “*Maison Tropicale*” destinadas às colónias francesas, em África, concretamente uma para *Niamey*, no *Níger*, em território com clima tropical, e duas em 1951, para *Brazzaville* no Congo, com clima tropical equatorial ^[4]. Analisando o trabalho desenvolvido por *Jean Prouvé* durante a década de 50, sobre o qual se encontraram algumas publicações, verifica-se que existia a preocupação em potenciar a eficiência energética das casas que criou, tendo sido aplicadas estratégias de *design* passivo, ventilação natural, a orientação solar e o sombreamento da unidade habitável, e ao mesmo tempo tirando-se partido das qualidades dos materiais utilizados, pelo que as casas criadas nos anos sessenta por *Jean Prouvé* podem ser consideradas exemplos de arquitetura sustentável ^[4]. Foram introduzidas técnicas de isolamento revolucionárias, sendo as paredes compostas por camadas produzindo uma “arquitetura de *layers*” ^[4] que, de acordo com *Prouvé* resistiam às condições climáticas mais adversas, segundo ele, à semelhança das paredes dos aviões. No entanto, as paredes das “Casas para os Trópicos” foram recusadas pelo arquiteto do início do séc. XX, *Charles Rennie Mackintosh*, devido à ausência de massa ^[4]. Contudo, a intenção de *Prouvé* foi precisamente alterar a casa tradicional, reduzir o seu peso habitual, devido não só a questões de transporte, como também em consequência dos processos de fabricação utilizados ^[4], e o seu aspeto maciço utilizando técnicas novas e propondo uma maneira diferente de fazer casas que culmina na habitação pré-fabricada. Apesar de tudo, não existem evidências que estas casas desenvolvidas para *Niamey* e *Brazzaville* tenham respondido de forma positiva ao clima extremamente agressivo que se faz sentir em África. Por essa razão, é interessante experimentar também algumas das técnicas introduzidas por *Jean Prouvé* neste estudo para avaliar o seu efeito no comportamento térmico.

1.3.1.1 Evolução das casas pré- fabricadas de tipo modular

O termo ‘pré-fabricado’ é uma fusão de sistemas de construção por painel e sistemas de construção modulares, e pode significar tanto um como outro. No uso de hoje, o termo ‘pré-fabricado’ está mais estreitamente relacionado com o estilo da casa, geralmente modernista, ao invés do método específico de construção da casa ^[5].

As construções pré-fabricadas são fruto da industrialização do século XIX. De acordo com *Colin Davis* ^[5], a figura mais importante na história recente das casas pré fabricadas é *Charles Jeanneret Gris*, mais conhecido por *Le Corbusier*, defensor da causa Modernista, movimento através do qual a arquitetura foi projetada para as grandes massas, enfrentando uma sociedade industrializada. Defendeu que as casas deveriam ser produtos standardizados, construídas em fábricas, em série, da mesma forma que se produziam carros. Já naquele tempo havia a preocupação de construir casas com materiais adaptados à região. As casas pré-fabricadas foram a solução não só para a escassez de habitações no final da segunda Guerra Mundial, como para alojar trabalhadores da indústria, imigrantes e desalojados das guerras e de catástrofes naturais.

As casas pré-fabricadas evoluíram bastante na sequência de um desafio lançado pela *Dwell Magazine* a um grupo de arquitetos que transformaram as criações de *Le Corbusier*, *Frank Lloyd Wright* a *Philippe Starck*, em casas “arejadas e modernas, bem iluminadas, sedutoras e intransigente no seu grande lote de madeira” ^[5].

A partir de 1990 a construção pré-fabricada emancipou-se lentamente da fama da produção em massa e barata, e arquitetos de topo, como *Daniel Libeskind* começaram também a desenhar estes modelos, posteriormente erguidos segundo os critérios de sustentabilidade mais recentes.

Apresenta-se de seguida a evolução das casas pré-fabricadas até às casas modulares mais atuais, na perspetiva de *Cobbers*, *Jahn* e *Gossel*, e que merecem maior destaque no âmbito deste trabalho, devido às soluções de conforto térmico e climatização subjacentes a cada modelo construtivo.



Figura 1- Kupferhaus ^[3].

A *Kupferhaus* tinha estrutura de madeira e a fachada desta casa era feita com placas finas de eternit (fibrocimento), revestidas com chapa de cobre ondulada e isoladas com folha de alumínio. Inicialmente o telhado era fabricado com chapas de cobre. “Não se verificou a acumulação térmica temida na altura, mas a receção de rádio era bastante dificultada nesta autêntica gaiola de *Faraday*”^[3]. Posteriormente os painéis de aço no interior foram substituídos por placas de alumínio. Esta casa pré-fabricada era comercializada sendo publicitada pelo seu bom conforto térmico através da frase “ Mesmo com o maior calor, a sua casa mantém-se fresca! ”^[3].

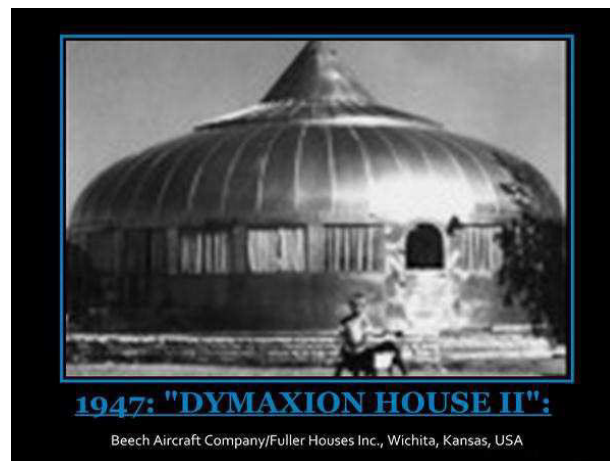


Figura 2- Dymaxion house II ^[3].

A *Dymaxion House II* foi desenvolvida numa fábrica de aviões. O telhado tinha uma forma arredondada e possuía uma ventoinha no topo responsável pela ventilação da casa. O telhado serviria também para recolher água da chuva. Durante a conceção desta casa já se verificaram preocupações com a questão da ventilação, existindo esboços das correntes convexas de ar na casa. A forma arredondada da casa diminui bastante as perdas de calor e os materiais usados ^[3].

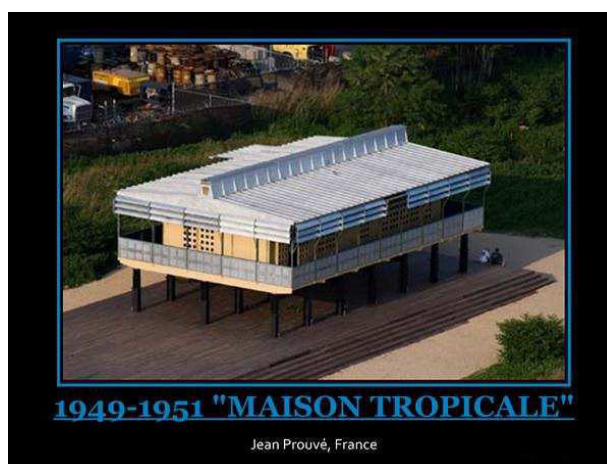


Figura 3 - Maison Tropicale ^[3].

No âmbito deste trabalho deverá ser dada especial atenção à *Maison Tropical*, já referida. Estas casas eram sustentadas por palafitas, e o núcleo central era constituído por paredes de alumínio, umas fixas, outras corrediças, com orifícios redondos, tipo escotilha; este núcleo era circundado por um passadiço estreito, igualmente circundado por corrimões e lamelas reguláveis para proteção solar. O telhado tinha “duas camadas” e a ventilação natural entre aquelas servia para reduzir o aquecimento das chapas do telhado expostas ao sol. Todas as peças de sustentação eram feitas de chapa de aço curvado e as restantes, em particular o telhado eram de chapa de alumínio. Estas casas eram demasiado caras ^[3].

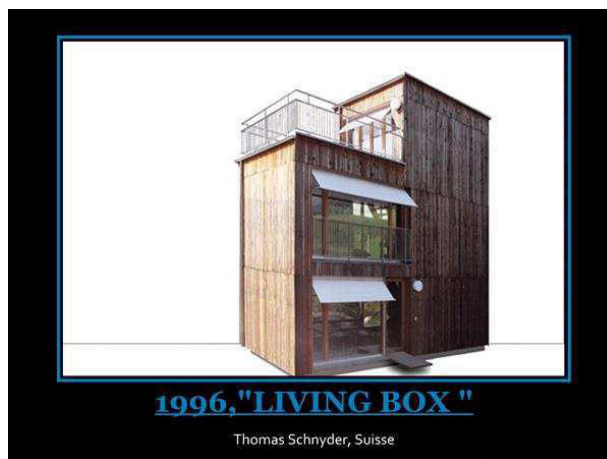


Figura 4 – Living Box ^[3].

Segundo *Cobbers, Jahn e Gossel* ^[3] a *Living Box* é uma casa de ganho direto, na medida em que consome uma trigésima parte da energia térmica das casas convencionais quando construídas em local com boa exposição solar, devido à orientação da casa, que abre para Sul, enquanto as restantes fachadas permanecem quase sempre fechadas; a energia solar captada é armazenada na cobertura maciça de madeira e betão e depois transferida para o interior”. Por outro lado, o exterior do edifício, constituído por celulose de papel reciclado e janelas especiais, é hermético e termo-isolante. O sistema de ventilação com recuperação de calor reduz a perda de energia. A água canalizada é aquecida através da energia residual do sistema de exaustão da casa, de coletores solares ou de bombas de aquecimento. A utilização de painéis fotovoltaicos pode reduzir ainda mais o consumo de energia.



Figura 5 – Micro Compact Home ^[3].

A *Micro Compact Home* ^[3] é um cubo com uma área de construção de apenas 7m² recorrendo às tecnologias mais avançadas. A estrutura é um esqueleto de madeira com exterior em painéis planos de alumínio anodizado e um interior revestido a PVC. O soalho é de base epóxida, as janelas possuem vidros duplos. Para garantir um bom isolamento, foi selecionado um isolamento a vácuo especial.



Figura 6 – Black Barn ^[3].

O modelo *Black Barn* tem um telhado de madeira alcatroado, revestido com madeira de pinho pintada de preto, contrastando com o interior que é branco. Segundo *Cobbers, Jahn e Gossel* ^[3], esta casa engloba elevados padrões ecológicos e energéticos.

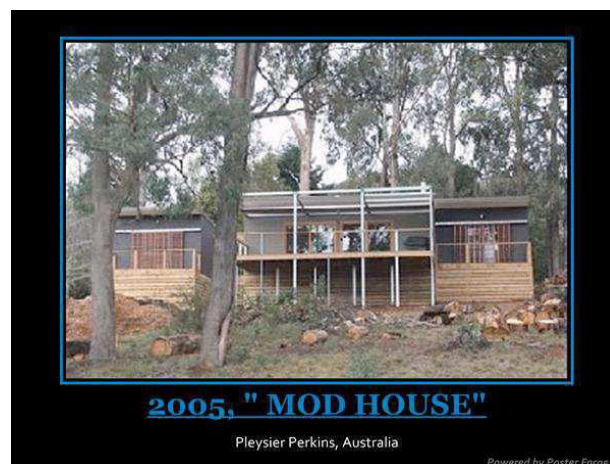


Figura 7 – Mod House ^[3].

Este modelo de grande área útil é um sistema muito flexível de 2 módulos pavilhões, que podem ser combinados de forma aleatória I, L, U. Consomem energia solar e dispõem de um sistema de reaproveitamento de água ^[3].



Figura 8 – Marmol Radziner Prefab ^[3].

Estas casas em módulos pré-fabricados, com estrutura em aço, têm a particularidade do telhado ser alongado para além das paredes protegendo do sol. “O soalho inclui placas de metal sobre as quais se aplica uma camada de betão que acumula o calor para os meses mais frios” ^[3]. A energia necessária no interior da casa é captada exclusivamente por painéis fotovoltaicos.



Figura 9 – Livinghome Rk1 ^[3].

A *Livinghome Rk1* ^[3] é construída com módulos tipo torre produzidos sobre estruturas de aço e foi a primeira casa pré-fabricada a receber o Prémio *Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)*, que consiste numa certificação para edifícios sustentáveis. Esta casa inclui a recolha de água da chuva para utilização no jardim, células fotovoltaicas para melhorar o equilíbrio energético, alguns envidraçados de policarbonato e uma ventilação mais favorável nas casas de banho. Tem também vegetação no interior para melhorar a qualidade do ar interior.



Figura 10 – Boxhome ^[3].

Segundo *Cobbers, Jahn e Gossel* ^[3], estas casas cúbicas de madeira com fachada revestida com chapas de alumínio são económicas e ecologicamente vantajosas, pois requerem pouco material e consomem pouca energia.

1.3.1.2 Tipos de casas pré-fabricadas

As casas pré-fabricadas evoluíram de modelos simples até modelos contemporâneos, dividindo-se em dois tipos distintos: as casas manufaturadas ou pré-moldadas e as modulares que são consideradas o parente de alta qualidade das casas pré-fabricadas, uma vez que apresentam diversas vantagens relativamente às primeiras, devido à evolução tecnológica subjacente aos processos construtivos, que integram métodos de construção sustentável ^[6].

Casas manufaturadas ou pré-moldadas são construídas numa moldura de aço amovível, designada *chasse* que é usada no transporte e na sustentação permanente da casa, podendo, também ser colocada sobre fundações permanentes das casas ^[6].

As casas modulares são unidades ou módulos construídos numa fábrica e posteriormente montados no local de implantação; não se tratam de casas móveis e estes modelos são muito versáteis, podem ser construídos com materiais mais caros e ter áreas maiores que as casas manufaturadas, além de apresentarem outras possibilidades, apresentadas adiante, mas que podem tornar este tipo de construção numa alternativa mais dispendiosa ^[6]. No entanto a construção modular evoluiu no sentido de dar resposta às necessidades de habitação com melhor qualidade e preços baixos, através da racionalização e industrialização da construção.

1.3.1.3 Casas pré-fabricadas modulares e sustentabilidade

Buckminster Fuller foi um arquiteto visionário, que nasceu no final do século XIX e desenvolveu projetos que visavam essencialmente a eficiência e o baixo custo de habitações e transportes ^[7]. Na obra *Spaceship Earth*, *Fuller* aponta para as preocupações ambientais, alertando para a necessidade de controlar a utilização dos recursos ambientais de modo a reduzir o desperdício de matéria-prima, de energia e o impacto no planeta Terra, que comparou a uma nave espacial, à deriva, pelo universo. É desta maneira que *Buckminster Fuller* chama a atenção para o facto dos recursos do planeta serem finitos, e para a necessidade global de preservação, revelando o seu lado ambientalista ^[8]. Foi ele quem desenvolveu a *Dymaxion House II*, uma das casas pré-fabricadas apresentadas na alínea 1.3.1.1.

Jean Prouvé também introduziu princípios de construção sustentável nas suas casas para os trópicos, com o objetivo de minimizar o consumo energético da habitação, tendo aplicado entre outras, técnicas de isolamento avançadas para a altura. Além disso, também teve em consideração a qualidade dos materiais, tendo optado pelo alumínio devido às suas propriedades anticorrosivas que são convenientes em climas tropicais húmidos. As suas casas, à semelhança de muitos outros modelos, têm restrições ao nível de espaço e de peso, o que se deve à necessidade de acondicionar bem o produto e de o transportar para grandes distâncias, permitindo simultaneamente diminuir o consumo de recursos, que é um dos princípios básicos atuais da sustentabilidade, enunciado por *Kibert*.

A construção sustentável promove intervenções sobre o meio ambiente, sem esgotar os recursos naturais, preservando-os para as gerações futuras. Tal modelo de construção utiliza ecomateriais e soluções tecnológicas inteligentes que promovem a redução de poluição, o bom uso e a economia da água e da energia e o conforto dos seus utilizadores.

As casas modulares adequam-se ao conceito de construção sustentável, pois a sua conceção esteve, desde cedo, subjacente à necessidade de reduzir o espaço ocupado, e portanto o tamanho das habitações e consequente poupança dos materiais de construção. Não obstante existirem casas modulares de grandes dimensões, a tendência é para se conseguir o máximo de rentabilidade a todos os níveis num espaço reduzido, pondo em prática tecnologias sustentáveis e adequadas ao estilo de vida atual e futuro, condicionado pela própria crise económica e imobiliária, que obriga à procura de habitações mais baratas. A minimização do consumo de recursos e a redução de resíduos em obra são vantagens relevantes destes modelos construtivos sobre os edifícios comuns que, devido aos materiais aplicados e técnicas de construção, obrigam à elaboração de planos de gestão de resíduos produzidos em obra. O conceito de construção modular é caracterizado pela standardização e otimização de processos de construção como forma de reduzir prazos e custos de produção ^[9]. O controlo da qualidade, a gestão de resíduos produzidos e a racionalização de consumos é mais exequível nas casas modulares, uma vez que os módulos são produzidos em fábricas que habitualmente obedecem a diretrizes rigorosas de normas de controlo da gestão, rotulagem e desempenho ambiental e também de controlo de qualidade entre outras, que permitem ir de encontro aos princípios básicos para a sustentabilidade aplicada à construção.

1.3.2 Caracterização climática e Climatização em regiões tropicais

O clima equatorial é quente e húmido o ano todo e abrange parte das regiões central e ocidental do continente Africano. No restante território, do Centro ao Sul, predomina o clima tropical quente com Invernos secos e chuvas de Verão. Estes climas distinguem-se mais pelas variações pluviométricas do que pelas térmicas. As regiões equatoriais são bastantes húmidas e têm temperaturas elevadas, embora moderadas pelas chuvas constantes, a oscilação térmica é reduzida, com médias de 25⁰ C, podendo-se atingir temperaturas máximas superiores a 40⁰ C. Assim, a climatização nestas regiões deverá envolver sobretudo a instalação de sistemas de arrefecimento eficazes.

Existem publicações recentes do Departamento de Energia dos EUA, sobre boas práticas de construção em climas tropicais quentes e húmidos ^[10], normas da ASHRAE, e normas para a

construção de casas passivas, (Norma *Passivhaus*, publicada na Alemanha e que já foi aplicada a climas quentes da Europa, no âmbito do projeto *Passive-on*) ^[11], todas elas direcionadas para soluções construtivas de casas confortáveis de baixo consumo energético incluindo, por exemplo, requisitos de construção da envolvente de edifícios. Por exemplo, o Departamento de Energia dos EUA apresenta soluções construtivas, assim como sistemas de climatização passiva e mecânica para climas quentes que podem, eventualmente ser testadas neste trabalho. No entanto, nenhum dos casos de estudo exemplificados recai sobre casas pré-fabricadas modulares mas antes sobre moradias com grandes áreas e com sistemas de climatização mecânicos com alguma complexidade.

1.3.3 Conforto térmico, importância do clima e construção bioclimática

1.3.3.1 Conforto térmico

A *ASHRAE* define conforto térmico como “o estado de espírito em que o indivíduo expressa satisfação em relação ao ambiente térmico”, o que implica uma condição de equilíbrio com o ambiente envolvente. Este equilíbrio resulta de um balanço térmico que depende de fatores como o metabolismo, o vestuário, sexo, a idade, a temperatura da pele, a temperatura do ar, temperatura do ambiente, temperatura superficial dos elementos num compartimento (móveis), temperatura de radiação média, humidade relativa e velocidade do ar ^[12]. A sensação de conforto térmico também está associada ao estado de espírito dos ocupantes e o seu objetivo é proporcionar condições exteriores de forma a minimizar a utilização de mecanismos de regulação térmica pelo corpo humano.

A utilização de equipamentos para arrefecimento tem contribuindo bastante para o aumento do consumo energético e para o excesso de emissões de CO₂ e para o consequente aquecimento global. Segundo *Humphrey e Nicol* ^[13] a solução está na obtenção de um bom *design* climático dos edifícios. Assim, as normas de conforto térmico, que deve ser obtido com o mínimo possível de consumo energético, são uma ferramenta essencial para obter um ambiente interior dos edifícios termicamente confortável para os ocupantes.

Existem diversos métodos de análise, sendo um deles o modelo de *Fanger* PPD-PMV que é o mais aceite atualmente e sobre o qual assenta a norma ISO 7730:2005, que baseia a avaliação de conforto térmico no conhecimento e na medição de parâmetros físicos do ambiente interno como a temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade e humidade do ar. Este modelo é baseado nas experiências de *Fanger* ^[14], realizadas em câmaras climáticas, em ambiente estacionário e utilizando uma amostra de 1296 estudantes vestidos com roupas *standard*, exercendo atividades também *standard*, mas expostos a diferentes temperaturas. A avaliação foi realizada pelos participantes utilizando a escala ASHRAE de sete pontos, compreendida entre -3, para muito frio e +3 para muito calor, sendo o valor central 0, o correspondente ao estado de conforto. Foi também realizado um estudo com uma abordagem um pouco diferente em que os participantes, nas mesmas condições, tiveram acesso ao controlo da temperatura regulando-a até se sentirem termicamente neutros. Após diversas experiências, *Fanger* obteve uma equação que descreve o conforto térmico como o desequilíbrio entre o fluxo de calor instantâneo (num dado ambiente térmico) e o fluxo de calor necessário para atingir o conforto térmico para uma determinada atividade. Esta equação relaciona as condições térmicas com a escala ASHRAE de sete pontos, originando o índice PMV (*Predicted Mean Vote*). Este índice foi combinado com o PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*), dando origem ao modelo de *Fanger* PMV-PPD atualmente aceite, válido e muito utilizado em projetos e que combina a teoria do balanço térmico com a fisiologia humana, determinando a faixa de temperaturas confortáveis para os ocupantes dos edifícios.

Existem também os modelos adaptativos que são métodos de análise alternativos, baseados em critérios de conforto, definidos através de experiências de campo com pessoas que ocuparam um determinado ambiente traçado, e que relacionaram a sensação térmica com a temperatura externa média mensal. Estes modelos foram idealizados a partir do reconhecimento de fatores de adaptação, resultado da tendência natural que as pessoas têm para se adaptar às alterações ambientais. “ Se uma mudança ocorre de tal forma a produzir desconforto, as pessoas reagem de forma a restaurar seu conforto” ^[15]. Quanto maiores forem as oportunidades de adaptação ou de controlo do ambiente, menor será a exposição do ocupante ao *stress* térmico.

Segundo *Dear e Barger* ^[16], as discrepâncias entre o observado e o estimado por índices baseados em modelos de balanço térmico, como o de *Fanger*, em edificações ventiladas naturalmente são decorrentes da inobservância de fatores de adaptação. *Nicol* ^[17] observa que o balanço térmico

em ambientes condicionados passivamente é mais complexo, pois os seus ocupantes podem interagir com a edificação ou com o ambiente através de diferentes oportunidades de adaptação, como abrir uma janela, fechar uma cortina, trocar a roupa, mudar a atividade, ligar um ventilador, etc... *Dear* e *Brager* ^[16] resumem a adaptação térmica aos ajustes comportamentais, fisiológicos e psicológicos. Segundo *Baker* e *Standeven* ^[18] a interatividade associada à abordagem adaptativa representa a conhecida oportunidade adaptativa que cria a sensação do aumento de conforto, mesmo sem que se verifique a alteração das condições ambientes, concluindo-se que quanto maior for a possibilidade de interação, maior é a adaptação às diferenças de temperatura sentidas.

Conforme *Nicol* e *Humphreys* ^[15] a faixa de condições considerada confortável depende tanto das características da edificação como das oportunidades de adaptação individual do ocupante. Portanto, a aplicação dos modelos adaptativos adequar-se – ia melhor às condições de residências naturalmente ventiladas em climas tropicais em virtude das maiores oportunidades de adaptação que esse tipo de uso pode oferecer, permitindo ao ocupante recorrer em qualquer período de ocupação a estratégias de ocupação como diminuição da resistência da roupa com a troca de peças de roupa, uso do movimento de ar através da operação de abertura (janelas, portas, entre outros), e uso de ventiladores de teto e de mesa, alteração da atividade metabólica através da mudança na atividade desenvolvida, de sua intensidade ou pela ingestão de alimentos e/ou bebidas.

O modelo PMV de *Fanger* é o mais restritivo quanto à sua aplicação em edifícios ventilados naturalmente em climas tropicais. Hoje existe o consenso entre investigadores de que as condições de conforto térmico estimadas por normas como a ISO 7730 e ASHRAE Standard 55-2004 (a ASHRAE Standard 55-2004, na sua ultima versão, já apresenta uma alternativa ao modelo PMV/PPD de *Fanger* através do modelo adaptativo denominado *Adaptive Comfort Standard* (ACS)), que de forma total ou parcial se baseiam no modelo de *Fanger*, não se aplicam adequadamente a regiões de clima tropical. Arquitetos e engenheiros defrontam-se com limitações de normas internacionais como a ISO 7730, que superestima a resposta dos ocupantes, na escala da ASHRAE, a temperaturas elevadas e subestima a baixas temperaturas ^[17]. Assim, tem-se como resultado a estimativa de desconforto de pessoas que em estudos de campo estariam em conforto, negligenciando faixas de temperaturas em que as pessoas poderiam estar em conforto ^[17]. O índice de *Fanger* superestima a sensação de conforto para o calor, principalmente

em climas quentes. As imprecisões na determinação dos valores da taxa metabólica e da resistência do vestuário em função do clima e de aspetos culturais, bem como na subjetividade envolvida nos outros fatores pessoais, também conferem maior fragilidade aos índices de avaliação de conforto térmico que se utilizam desses parâmetros. No entanto, *Fanger e Toftum* ^[14] apontam que o modelo atual é bem flexível, podendo estimar a temperatura de neutralidade entre 10 e 35 °C, dependendo das outras cinco variáveis, e que o modelo apresenta bons resultados mesmo sob as pequenas variações comuns em ambientes internos.

1.3.3.2 Importância do clima

O clima é o conjunto de condições atmosféricas, caracterizado pelos estados do tempo e evolução destes, numa determinada região, ao longo de um período suficientemente grande ^[19]. O estado do tempo é um conjunto de fenómenos meteorológicos que determinam um estado da atmosfera num dado instante e num certo lugar, e é descrito por diversas variáveis climáticas tais como a temperatura, humidade relativa, velocidade e direção dos ventos e precipitação.

As pessoas classificam o clima de diversas formas, dependendo do conhecimento que têm acerca do sistema climático e das informações que necessitam ^[18]. Por exemplo, a maioria dos atlas têm mapas de temperatura e precipitação em todo o mundo, e alguns incluem mapas de pressão atmosférica, ventos, correntes oceânicas e da quantidade de gelo no mar durante todo o ano. Muitos países têm classificações mais detalhadas, por diversas razões. Por exemplo, as datas médias das primeiras e últimas geadas (que aniquilam plantas e culturas) são de grande valor para os agricultores e produtores.

O conforto térmico é influenciado pelo clima, devendo a construção de um edifício ser projetada tendo em consideração os valores médios das variáveis climáticas e também valores máximos e mínimos registados ao longo do dia e do ano. Para qualificar a influência de um clima no ambiente térmico dos edifícios, de forma a atingir níveis de conforto, é importante caracterizar a severidade desse clima, o que é possível através do conceito "Graus-dia", usado frequentemente por peritos que trabalham no consumo energético e conforto térmico dos edifícios.

Ao longo dos anos foram desenvolvidos alguns sistemas de classificação climática, destacando-se a Classificação Climática de *Köppen* ^[20]. Este é o sistema de classificação global dos tipos

climáticos mais utilizada em geografia, climatologia e ecologia e foi proposta em 1900 pelo climatologista alemão *Wladimir Köppen*, tendo sido melhorada ao longo dos anos com a colaboração de *Rudolf Geiger*, sendo na atualidade também conhecida como Classificação Climática de *Köppen-Geiger*^[20]^[21]. Este sistema de classificação baseia-se no pressuposto, de que a vegetação natural de cada grande região da Terra é a tradução do clima que nela existe. Assim, as fronteiras entre regiões climáticas estabelecidas correspondem, tanto quanto possível, às áreas de predominância de cada tipo de vegetação, razão pela qual a distribuição global dos tipos climáticos e a distribuição dos biomas apresenta elevada correlação. Na determinação dos tipos climáticos de *Köppen-Geiger* são considerados a sazonalidade e os valores médios anuais e mensais da temperatura do ar e da precipitação. Cada grande tipo climático é identificado por um código, constituído por letras maiúsculas e minúsculas, cuja combinação resulta nos tipos e subtipos considerados^[20]. Esta classificação é a utilizada no para os ficheiros climáticos disponíveis no *software* usado neste trabalho.

O clima alvo do estudo é o tropical com chuvas de Verão, designado por Aw, segundo a classificação climática de *Köppen-Geiger*, e que é típico de Dakar, capital do Senegal. O clima é geralmente quente e húmido durante todo o ano. Há duas estações: a chuvosa, de Junho a Outubro e a estação seca, entre Novembro e Maio. A humidade é maior durante a estação chuvosa. A precipitação varia entre 300 milímetros no extremo Norte e 1.500 mm no extremo Sul. As temperaturas médias durante a estação seca variam entre (22 ° C e 30 ° C. Em Dakar a temperatura média é 24 ° C de Janeiro a Março, entre 25 ° C a 27 ° C, em Abril, Maio e Dezembro, e 30 ° C entre Junho e Outubro^[22].

Importa realçar que as classificações climáticas podem nem sempre ser unânimes, tendo-se neste caso adotado as classificações concordantes com as disponíveis para estas regiões, no *software* utilizado.

No clima tropical as condições ambientais tendem a expor o corpo a uma situação de desconforto térmico em que este ganha calor. O corpo mantém o equilíbrio térmico através da termorregulação para dissipar essa energia e compensar esses ganhos. Os mecanismos de ajuste da temperatura interna do corpo são a vasodilatação que aumenta o fluxo de sangue e a dissipação de calor e a transpiração^[23]. Estes mecanismos fisiológicos estão associados à aclimação (o corpo adapta-se a condições ambientais às quais está exposto, diminuindo a

sensação de desconforto) e envolvem também ajustes psicológicos e fisiológicos que ocorrem sempre que o corpo é exposto a condições adversas de *stress* térmico. O vento é responsável pelo aumento das trocas por convecção e promove o arrefecimento evaporativo do corpo ^[23] e as velocidades acima de 5m/s são quase sempre desconfortáveis para qualquer tipo de atividade exercida ^[24]. Valores elevados de humidade relativa, acima de 65%, podem dificultar o efeito de arrefecimento evaporativo provocado pelo movimento do ar e baixas humidades podem gerar problemas de ressequecimento de mucosas e da pele gerando desconforto físico.

Nas regiões de climas quentes, os modelos construtivos adotados, são muitas vezes inadequados pois provêm de soluções adaptadas maioritariamente aos climas temperados, de onde resultam ambientes desconfortáveis. Por isso é muito importante estudar estratégias construtivas adequadas às características do clima e de conforto em regiões de clima tropical. Segundo *Szokolay* ^[23], este é o clima mais difícil de projetar, devido nomeadamente às altas taxas de humidade e aos problemas associados às chuvas intensas concentradas em pequenos períodos do ano. *Szokolay* também defende que as regiões próximas da linha do Equador também acabam por sofrer a acumulação de grande quantidade de calor pela cobertura em virtude da passagem do sol próximo do zénite.

1.3.3.3 Construção Bioclimática

A arquitetura bioclimática consiste no desenho dos edifícios tendo em consideração as condições climáticas, utilizando os recursos disponíveis na natureza (sol, vegetação, chuva, vento) para minimizar os impactes ambientais e reduzir o consumo energético ^[25]. O investimento, por vezes elevado deste tipo de construção pode ser compensado com a diminuição dos gastos energéticos. Um dos principais objetivos da arquitetura bioclimática é obter naturalmente as condições de conforto, através da aplicação de sistemas passivos. A maior adaptação de um edifício ao clima leva à diminuição de consumo de energia para a obtenção de conforto. O desempenho do edifício dependerá assim das estratégias bioclimáticas contempladas durante a fase de projeto, entendendo-se por estratégias bioclimáticas “como um conjunto de regras ou medidas de carácter geral destinadas a influenciarem a forma do edifício bem como os seus processos, sistemas e componentes construtivos”. As estratégias a adotar num determinado edifício ou projeto deverão ser selecionadas tendo em atenção a especificidade climática do local, função do edifício e

consequentemente, modo de ocupação e operação do mesmo, com o objetivo de promoverem um bom desempenho em termos de adaptação ao clima” [26].

Os sistemas passivos são dispositivos construtivos integrados nos edifícios para promover naturalmente o aquecimento ou arrefecimento do interior, sem recurso a eletricidade ou algum tipo de combustível. Os sistemas de aquecimento tentam maximizar a captação de energia usando-a direta ou indiretamente, no momento da captação ou armazenando para usar quando necessário. Os sistemas de aquecimento passivo podem ser de ganho direto (envidraçado), indireto (paredes trombe, parede massiva, colunas de água) ou isolado (espaço estufa).

Os sistemas de arrefecimento tentam utilizar as fontes de arrefecimento possíveis, tais como o solo, que se encontra sempre a uma temperatura inferior à da superfície, e o ar exterior, que apresenta uma temperatura inferior à do interior do edifício em determinadas horas do dia (principalmente durante a manhã e ao fim da tarde e noite). Sistemas de arrefecimento evaporativo (provocado pela evaporação da água) e radiativo (emissão de radiação/calor pelos elementos envolventes do edifício) também são opções possíveis. Exemplos de sistemas de arrefecimento passivo são a ventilação natural, arrefecimento pelo solo, arrefecimento evaporativo e radiativo.

O conhecimento do clima é o ponto de partida para a conceção de um edifício passivo, com desempenho adequado. As estratégias bioclimáticas mais utilizadas em climas tropicais com vista ao arrefecimento e desumidificação são a promoção da ventilação natural para remover calor e humidade, a promoção das perdas pelo solo e a restrição de ganhos solares.

O arquiteto Van Lengen [27] defende que em climas quentes e húmidos devem existir aberturas nas paredes para favorecer a ventilação natural e também no telhado para extrair o ar quente. As janelas devem ser grandes e estar posicionadas de forma a favorecer a ventilação, dispondo de mecanismos exteriores de sombreamento direto para proteção solar e da chuva. As janelas altas ajudam a retirar o calor junto ao teto. Por outro lado as janelas deverão ser pequenas para minimizar os ganhos solares e a poeira proveniente das tempestades de areia [27]. São muito usados sistemas de desumidificação de ar, utilizando por exemplo, substâncias higroscópicas como a madeira ou paredes em terra. Os tetos inclinados com várias águas favorecem a escorrência da chuva e podem estar a níveis diferentes facilitando a ventilação natural. Os beirais

estendidos fazem sombra e evitam as chuvas nas paredes. As extensões (prolongamento da cobertura) e alpendres criam sombra à volta das paredes. Por outro lado, as coberturas horizontais são recomendadas para os climas muito quentes e secos, e em casas de maiores dimensões os pátios internos fomentam a ventilação natural ^[27]. A vegetação é utilizada para o sombreamento, por exemplo árvores de folha perene, e também porque fomentam a evaporação. Em locais com climas quentes e húmidos as casas são muitas vezes construídas em morros ou elevações, onde há mais movimentos de ar e os pisos podem ser elevados para evitar a humidade e o frio. No entanto, nas regiões com climas quentes e secos os pavimentos devem estar em contacto com o solo ^[27]. A divergência das soluções construtivas relativas por exemplo às janelas e pavimentos evidenciam a dificuldades referidas por *Szokolay* ^[23], em projetar casas para climas muito quentes e húmidos com elevada pluviosidade concentrada num período mais curto. Para a conceção de edifícios localizados em climas húmidos, dever-se-á limitar o nível térmico interno através de um sombreamento eficaz e de uma orientação, forma e dimensão da cobertura adequadas, sendo o telhado o elemento estrutural e exterior dominante, devendo ser opaco à radiação solar, com um máximo de isolamento, e com grandes beirais para proteger os habitantes contra o sol baixo. Deve-se também assegurar proteção visual contra a elevada luminosidade dos céus nublados, através do sombreamento dos vãos e do tratamento do espaço envolvente da habitação, de modo a evitar a ocorrência de reflexões luminosas secundárias. O sombreamento de todas as superfícies verticais, através do prolongamento das coberturas ou telhados para fora do alinhamento das paredes, reduz os ganhos térmicos. Na publicação “ O problema do conforto térmico em climas tropicais e subtropicais” ^[28], Rui José Gomes afirma que os edifícios construídos em regiões próximas do Equador devem estar orientados segundo a direção Este – Oeste, ficando com as suas fachadas principais expostas a Norte e a Sul.

No capítulo três as opções construtivas propostas são ilustradas com diversos exemplos de estudos científicos recentemente realizados sobre a otimização do conforto térmico de edifícios em climas tropicais húmidos. No entanto, muitos dos edifícios alvo são quase sempre destinados a ocupação intermitente (escritórios). Sabendo que a adequabilidade das soluções construtivas depende do perfil de utilização do edifício, conclui-se que a mesma solução construtiva pode ser adequada para um edifício destinado a escritórios e desadequada se o mesmo for destinado a ocupação permanente. Praticamente todos os estudos científicos encontrados são mencionados ao longo deste estudo.

1.3.4 Ferramentas de simulação de sistemas de climatização em edifícios

Para se projetar um edifício em condições térmicas ideais, é importante dispor de métodos de previsão e avaliação do comportamento térmico desses edifícios. Os métodos que podem ser mais ou menos detalhados, são programas de cálculo mais ou menos precisos e complexos que efetuam a simulação dinâmica do edifício em estudo permitindo obter parâmetros como temperaturas do ar ambiente, fluxos de calor, consumos energéticos ou frações solares ^[29].

Considerando um edifício novo durante a fase de projeto, com a simulação pode ter-se uma ideia relativamente precisa dos consumos de energia que o mesmo provavelmente terá no futuro. As metodologias de simulação dinâmica são, por isso, essenciais no projeto de edifícios energeticamente eficientes.

Os programas normalmente utilizados são acreditados pela norma ASHRAE 140-2004 ^[12], que procura minimizar as diferenças com origem nos próprios programas de simulação. Esta norma avalia as capacidades térmicas e aplicabilidade de cada *software*. Para tal, são simulados casos teste, em concordância com a norma, permitindo um enquadramento que possibilita a validação dos resultados nas vertentes analítica, comparativa e empírica.

De entre os programas que cumprem este requisito, destaca-se o *EnergyPlus*, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos EUA, utilizado neste trabalho, pois vem integrado no *DesignBuilder*. Outros programas acreditados são o *TRANSYS*, *HAP 4.31*, *TRACE 700*, *DOE-2*, *CLIM2000*, *CA-SIS*, *Visual DOE 4.1*, *TASE*, etc. Segundo a bibliografia consultada, estes métodos são bastante versáteis e fiáveis.

O modelo da casa modular em estudo é criado e parametrizado no *DesignBuilder versão 3.1.0.068*, que consiste num *software* desenvolvido no Reino Unido, para a criação e avaliação de projetos construtivos. Este programa tem algumas vantagens, pois permite visualizar os modelos de construção virtuais e também *layouts* de sistemas de sombreamento, fornecendo simultaneamente uma série de dados de desempenho como, por exemplo, o consumo energético e condições de conforto térmico. No entanto, nem sempre é possível criar modelos realistas devido à dificuldade de representação no programa de simulação, principalmente de alguns sistemas de climatização passiva.

A simulação dinâmica recorre a dados climáticos e o *software DesignBuilder* opera com algoritmos do *Energyplus* que atende às normais da *ASHRAE 90.1* (1999) e *ASHRAE 140* (2001), recorrendo a dois tipos de dados climáticos para aplicativos de simulação: o *TRY* (*Typical Reference Year*) e o *TMY* (*Typical Meteorological Year*). Os arquivos climáticos utilizados neste trabalho são do *IWEC* (*International Weather for Energy Calculation*), para Dakar no Senegal ^[31] que resultam do tratamento de registos horários de temperatura de bolbo seco e bolbo húmido, velocidade e direção do vento, radiação solar horária e iluminância, entre outros.

1.4 Contributo de trabalho

Tendo em conta o objetivo geral deste trabalho assim como a revisão bibliográfica efetuada, estabelece-se como principal contributo do presente trabalho a análise e especificação de soluções construtivas para edifícios modulares pré fabricados simultaneamente compatíveis com as exigências de climas do tipo tropical e com os constrangimentos inerentes a esta filosofia de construção. Esta análise será realizada recorrendo a ferramentas computacionais de simulação dinâmica de edifícios, considerando perfis de utilização pré definidos assim como um clima tropical que se considere típico e representativo.

Na definição das características construtivas (passivas e ativas) será dada uma especial atenção à integração de estratégias bioclimáticas passivas e ativas aplicáveis a climas tropicais húmidos com estação seca. Será dada uma especial atenção à minimização dos consumos energéticos para climatização, principalmente através da otimização da inércia da casa em estudo, pela aplicação de elementos construtivos adequados.

Pretendem-se encontrar soluções construtivas realistas, ou seja, adaptáveis à construção modular, sempre que possível com materiais sustentáveis e eficazes, que permitam obter um modelo construtivo pouco dispendioso, mas com condições de conforto térmico eficazes.

1.5 Estrutura da dissertação

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, sendo o primeiro de cariz introdutório, explicando os motivos da dissertação e a sua importância. Nele é introduzido o estado da arte das casas pré-fabricadas modulares, a metodologia e ferramentas aplicadas no trabalho, e também os principais objetivos e contributos que se esperam. No segundo capítulo, é desenvolvido o estado da arte dos modelos através de uma análise *SWOT*, e o terceiro é inteiramente dedicado à exposição de tecnologias de construção bioclimática e sustentável e sua importância, destacando-se os progressos tecnológicos associados ao conforto térmico e climatização. O quarto capítulo descreve um caso de estudo desenvolvido para o clima de Dakar, capital do Senegal e apresenta todos os resultados e sua discussão. As conclusões e as considerações finais sobre a importância do alargamento do tema a estudos futuros, seguidas das referências bibliográficas e dos anexos finalizam a dissertação.

2. Ecoeficiência e construção modular pré-fabricada sustentável

2.1 Introdução

No *World Business Council for Sustainable Development* de Genebra em 1996, ecoeficiência foi definida como sendo “a competitividade na produção e colocação no mercado de bens e/ou serviços que satisfaçam as necessidades humanas, trazendo qualidade de vida, minimizando os impactes ambientais e o uso de recursos naturais” . A ecoeficiência pode ser obtida através da união entre o fornecimento de bens e serviços sustentáveis a preços competitivos, que satisfaçam as necessidades humanas, promovendo a redução dos impactes ambientais e do consumo de recursos naturais.

A maior parte dos edifícios de todo o mundo, não são ecoeficientes uma vez que são responsáveis por cerca de 40% do consumo global de energia e pela resultante pegada de carbono, causando impactes ambientais irreversíveis. Existem oportunidades de reduzir a utilização de energia dos edifícios com menores custos e maiores retornos do que noutros setores, sendo que estas reduções são fundamentais para alcançar o objetivo da Agência Internacional de Energia (AIE), de redução de 77% na pegada de carbono do planeta em 2050, para atingir os níveis de CO₂ exigidos pelo Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas (IPCC, na sigla inglesa) ^[29].

O aumento da população mundial, (até ao ano 2030 espera-se que aumente mais de 2000 milhões de pessoas) e as necessidades implícitas em termos de construção de edifícios e outras infraestruturas, agravará o consumo de matérias-primas não renováveis, assim como a produção de resíduos ^[30]. Os impactes inerentes à construção serão ainda maiores sobre o nosso planeta porque o aumento demográfico tem lugar em países emergentes, nos continentes Asiático, Sul-Americano e Africano, onde a tecnologia e as técnicas de construção estão pouco evoluídas. Assim, torna-se premente implementar rapidamente novos métodos de construção e procurar melhorar as construções já existentes. Essas prioridades que são consideradas os pilares da construção sustentável, caracterizam-se por: garantir condições de higiene e segurança no trabalho, diminuir os custos, economizar energia e água, maximizar a durabilidade, minimizar a produção de resíduos, assegurar a salubridade dos edifícios, utilizar materiais ecoeficientes, etc. Os materiais de construção devem corresponder a algumas especificações técnicas, tais como, elevada durabilidade, serem reciclados, recicláveis, e sempre que possível, devem ser extraídos

de forma sustentável e provenientes de florestas com gestão sustentável, com emissões gasosas reduzidas ao longo do ciclo de vida, e devem também ter baixa energia incorporada (durante a fabricação e extração) e nula/baixa perigosidade em termos de manipulação e manutenção, baixo teor de radioatividade natural devendo também ser assegurada uma gestão eficaz de resíduos de demolição e construção ^[30].

Ao nível da construção, a integração de medidas passivas e mecânicas é crucial para projetos e construções de edifícios eficientes. A envolvente do edifício é o ponto de partida, começando com a orientação do edifício e a utilização da sombra. Outras medidas passivas incluem a massa térmica, a utilização de ventilação e luz naturais. As medidas mecânicas ou ativas poupam energia em serviços como a iluminação e AVAC através da utilização de lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) e de bombas de calor, por exemplo.

As casas pré-fabricadas modulares podem ter dimensões bastante reduzidas, permitem recorrer a materiais ecológicos, muitos com ciclo de vida completo, e a medidas de racionalização energética eficazes, trazendo um maior retorno sobre o investimento inicial.

2.2 Análise SWOT

Nas sociedades mais evoluídas, normalmente o consumidor não está familiarizado com o conceito da casa modular ou então não o aceita. Este ponto fraco pode constituir uma verdadeira ameaça para a prosperidade do negócio em países onde as pessoas estão habituadas a viver em casas com áreas relativamente grandes, construídas de acordo com os métodos tradicionais. São as pessoas com uma visão mais fundamentalista da problemática ecológica e /ou que tenham disponibilidade financeira, que optam por adquirir uma casa pré-fabricada modular, muitas vezes para destino de férias. No entanto, este ponto fraco pode tornar-se numa oportunidade de expansão e de aceitação em sociedades menos evoluídas, por diversos motivos:

As populações de países pobres emergentes do continente Africano não habitam em casas construídas de acordo com modelos arquitetónicos estereotipados, ou legalmente impostos como acontece por exemplo na Europa. Estes povos, alguns deles descendentes de indígenas, constroem as suas casas muito pequenas, de forma rudimentar, com matérias-primas locais como o adobo, canas e colmo. As suas casas são muito pequenas e albergam um número elevado de membros de uma só família, sendo por isso mais fácil para estes indivíduos, adaptarem-se às dimensões também reduzidas de uma casa modular. O êxodo rural é um fenómeno típico de

países em desenvolvimento, como por exemplo Angola, onde começam a surgir algumas oportunidades nas cidades para onde as pessoas se deslocam continuando a viver em condições pouco condignas. Estes indivíduos adaptam-se mais facilmente a uma casa modular unifamiliar, do que a apartamentos em edifícios destinados a habitação social. As casas modulares são unifamiliares, proporcionando mais privacidade e autonomia, além de permitir aos ocupantes manter a relação de proximidade com a natureza, a que estão habituados, mas dispendo de melhores condições de habitabilidade. Outro ponto fraco são os materiais leves que caracterizam a construção modular originando edifícios com inércia baixa e dificultando a obtenção de conforto térmico por métodos passivos. Um dos pontos fortes das casas modulares é estas serem quase totalmente fabricadas em unidades industriais e em série, de onde pode resultar um produto cada vez mais económico, mediante uma maior aceitação no mercado e consequente economia de escala. Pelas mesmas razões, se forem introduzidos materiais de construção inovadores e caros, mas que confirmem melhores condições de conforto e de durabilidade, rapidamente se poderá alcançar economias de escala. Uma vez que estas casas são construídas em fábrica será possível diminuir e controlar os resíduos produzidos, mitigando os impactes ambientais resultantes do aumento da construção, expectável nos próximos anos em países em desenvolvimento, devido à evolução demográfica.

A casa modular com o conforto térmico adequado aos climas tropicais em África, é desenvolvida com recurso a estratégias passivas, sendo alguns dos princípios concetuais das casas muito próximos das soluções construtivas indígenas, principalmente aquelas construídas nas regiões húmidas da floresta tropical Africana, por exemplo, no que se refere às estratégias de aproveitamento dos ventos cruzados e na adaptação à orientação cardinal. No fundo, o que se pretende transmitir é que estes modelos acabam por ter semelhanças com as casas tradicionais Africanas, enquadrando-se melhor nos hábitos de vida destes povos, do que nos padrões de vida de sociedades mais evoluídas.

2.3 Principais vantagens e desafios

A construção pré-fabricada modular apresenta diversas vantagens relativamente à construção tradicional. No processo construtivo realça-se a rapidez de execução, o controlo de qualidade, uma vez que esta se desenvolve essencialmente em ambiente industrial, ficando também este processo imune aos condicionalismos das intempéries.

Destaca-se também pelos princípios de sustentabilidade inerentes a este tipo de construção que é muito mais limpa, mais seca, produz poucos resíduos e utiliza materiais tecnologicamente evoluídos, com elevado índice de reciclagem, que conferem maior durabilidade e garantia de construção.

Estes modelos construtivos são habitualmente caracterizados por terem uma imagem arquitetónica moderna, e por serem facilmente aumentados através do acrescento de módulos, que são facilmente instalados em topografias mais exigentes. Os componentes modulares são projetados de forma a facilitar o seu transporte e a sua montagem nos locais da obra. Por esta razão também permitem a otimização do conforto térmico e energético, da edificação face à exposição solar. A construção modular oferece também a possibilidade de se incluírem espaços exteriores materializados por varandas e/ou alpendres ^[9]. São autoportantes e como tal passíveis de serem desmontadas e recolocadas noutra local.

Sendo certo que a construção modular está associada a uma versão mais moderna das casas pré-fabricadas tradicionais, também é uma realidade que estes modelos, muitos deles reconhecidos como exemplos de arquitetura sustentável, podem não ser ainda considerados como uma alternativa economicamente exequível. A introdução de ecomateriais e de outros materiais inovadores e de soluções que, segundo alguns fabricantes publicitam ^[9], conferem conforto térmico e diminuição de consumo energético, podem traduzir-se no encarecimento substancial destas casas, comparativamente com as construções pré-fabricadas tradicionais, que num passado não muito longínquo foram desenvolvidas essencialmente para realojar populações no pós guerra, ou depois de catástrofes naturais, para alojar emigrantes e para habitação social, sendo, por isso, habitualmente construções de baixa qualidade e baixo preço.

Uma vez que se pretendem encontrar soluções construtivas para adaptar uma casa modular de pequenas dimensões, para habitação, a um dos climas tropicais que caracteriza grande parte do continente Africano, será conveniente que essas soluções sejam concretizáveis com materiais

sustentáveis, economicamente acessíveis, e, ao mesmo tempo eficazes, permitindo obter um modelo construtivo acessível e ao mesmo tempo com condições de conforto térmico favoráveis. No entanto, não faz parte dos objetivos deste trabalho a realização do estudo financeiro das soluções apresentadas.

2.4 Resumo e conclusões do capítulo

A abordagem realizada neste capítulo aos conceitos de ecoeficiência, construção sustentável e o seu paralelismo com as casas pré-fabricadas modulares permitem concluir que estes modelos têm evoluído de forma a corresponder aos princípios de sustentabilidade e que os aspetos ambientais não foram menosprezados nem mesmo em modelos mais antigos como a *Dymaxion House II*, desenvolvida por *Buckminster Fuller*, arquiteto que criou as primeiras casas baseadas em princípios de *ecodesign* ^[32].

A construção modular assenta em princípios de sustentabilidade e pode harmonizar-se com os países emergentes, onde as casas tradicionais, muito pequenas e rudimentares, muitas vezes construídas com técnicas de climatização passiva que foram herdadas de povos indígenas, acabam por ter analogias com as casas modulares modernas.

A análise *SWOT* permite concluir que as casas modulares fabricadas de acordo com os princípios de sustentabilidade a preços acessíveis, satisfazendo as necessidades humanas e reduzindo os impactos ambientais e o consumo de recursos naturais, podem tornar-se num bom exemplo de ecoeficiência aplicada à construção.

3. Construção Bioclimática: opções construtivas e integração de soluções renováveis

3.1 Opções construtivas e parâmetros a ajustar

Um edifício que proporcione as condições de conforto pretendidas pelos ocupantes, deve estar adaptado ao clima, e ser projetado com recurso a tecnologia passiva a fim de minimizar o consumo de energia. A aplicação de estratégias de forma e localização do edifício, orientação, sombreamento, massa térmica, aquecimento/arrefecimento passivo, ventilação natural, isolamento térmico da envolvente (paredes, coberturas e pavimentos), fator solar (vãos envidraçados) e iluminação natural, influenciam bastante o desempenho térmico e energético de uma casa destinada a ocupação permanente ^{[33] [34]}.

3.1.1 Fator de forma

A forma de um edifício influencia a sua exposição ao vento, condicionando ainda a superfície de contacto edifício/exterior, tendo por isso influência nos ganhos de calor através da envolvente. A forma compacta de um edifício reduz a área total do envelope o que resulta numa menor transmissão das perdas de calor ^[35].

O fator de forma (FF) é uma relação geométrica que consiste na razão entre a superfície da envolvente da forma e o volume envolvido do edifício ^[36]. De acordo com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), “Fator de forma” é o quociente entre o somatório das áreas da envolvente exterior e interior do edifício ou fração autónoma com exigências térmicas e o respetivo volume interior correspondente.

A combinação que permite obter o FF menor é a esfera pois esta tem a menor superfície entre todos os sólidos e tem o maior volume o que conduz ao menor fator de forma. No entanto esta forma não pode ser aplicada na construção. A obtenção do FF surge através da formulação da conservação de calor nos edifícios tendo por princípio a Lei de *Fourier*, segundo a qual o fluxo de calor que se perde no Inverno depende da diferença de temperatura entre interior e exterior,

relação que depende das perdas por condução nas paredes e janelas e perdas pelas infiltrações ^[36]. O FF diminui num edifício que mantém o volume mas que aumenta a compactidade e isso traduz-se em menores perdas energéticas! O FF influencia os consumos de aquecimento máximo penalizando as formas menos compactas e é determinante na aplicação de estratégias bioclimáticas para o Inverno, portanto na arquitetura de edifícios localizados no Norte da Europa ^[36]. O FF varia com a forma e quanto mais recortado for um edifício, menos compacto será. As estratégias que são importantes nos grandes edifícios podem não ser nos pequenos e vice-versa, e em Portugal os pequenos edifícios necessitam de um sistema de aquecimento para satisfazer as exigências de conforto térmico. No entanto, estes poderão dispensar os sistemas de arrefecimento para o Verão, se forem bem concebidos. O FF é importante para determinar as perdas e ganhos de calor. Segundo *Basam Behsh* ^[37] quanto maior for a área de superfície maiores são os ganhos/perdas de calor através da mesma. Assim, pequenos FF implicam ganhos e perdas de calor mínimos. Para minimizar as perdas e os ganhos através do envelope de um edifício, é desejável uma forma compacta. A construção habitável mais ortogonal e compacta seria, então, um cubo. No entanto, esta configuração pode colocar uma grande parte da área do piso longe do alcance do perímetro da luz natural. Contrariamente a isto, um edifício que otimiza a iluminação natural e ventilação seria alongado para que uma maior área possível de construção esteja mais perto do perímetro. Embora isso possa parecer comprometer o desempenho térmico do edifício, as reduções de carga elétrica e de carga de arrefecimento alcançados por um sistema de iluminação natural bem projetado vai mais do que compensar o aumento das perdas pelo envelope ^[37]. Em climas quentes e secos o FF deve ser o mais baixo possível, pois isso irá reduzir os ganhos de calor, assim como em climas secos e frios também o FF deve ser tão baixo quanto possível para minimizar as perdas de calor. Em climas amenos e húmidos a principal preocupação é a criação de espaços arejados. Assim não será necessário minimizar o FF. Os fatores do ambiente externo que influenciam a transferência de calor através da envolvente do edifício são a temperatura exterior em contacto com a envolvente do edifício, a direção e velocidade dos ventos que sopram no edifício, e a radiação solar incidente sobre a construção. Em princípio, para minimizar a transferência de calor através da envolvente do edifício, a forma de construção deverá ser o mais compacta possível, tendendo a um cubo. No entanto, para otimizar a forma do edifício considerando os três fatores acima é uma questão mais complexa. Um cubo pode não ser o melhor, por exemplo, para minimizar a exposição das paredes aos ventos quentes do Oeste, bem como à radiação solar do lado ocidental. Aqui, têm que ser consideradas a orientação do edifício, assim como as dimensões relativas das superfícies voltadas para direções diferentes.

Basam Behsh ^[37], que pesquisou o problema, descobriu que o FF não é um indicador correto de comportamento térmico de edifícios com planos complexos. Para comparar diferentes opções de forma de construção, especialmente para edifícios com planos complexos, deverá recorrer-se a um *software* de simulação avançado.

3.1.2 Orientação solar

O sol enquanto fonte de calor e de luz é um elemento determinante no estudo do comportamento térmico dos edifícios, cuja estrutura deverá ser sempre protegida dos efeitos desta fonte energética, que em climas quentes pode originar situações de desconforto devido ao sobreaquecimento em edifícios com uma construção desadequada, sendo por isso fundamental aplicar soluções construtivas capazes de restringir os ganhos solares.

O conhecimento da trajetória do sol ao longo do ano, e da radiação solar incidente ou direta, devem ser fatores a ter em consideração na orientação dos edifícios, e também deve influenciar as soluções construtivas da envolvente, cujas fachadas podem ser construídas com materiais diferentes consoante a sua orientação. Da mesma forma os elementos de sombreamentos têm de ser orientados e projetados de acordo com a sua implementação nos diferentes lados da estrutura ^[38].

Quanto maior for a latitude de um local, menor será a quantidade de radiação solar recebida e, portanto, as temperaturas do ar tenderão a ser menos elevadas ^[39]. Nas regiões próximas do Equador a radiação solar é mais intensa na superfície horizontal de um edifício e é mínima nas paredes a Sul. As paredes a Este e a Oeste são os elementos verticais onde os valores da radiação são mais elevados. A orientação das fachadas principais de um edifício deve ser baseada no eixo Este/ Oeste, devendo as áreas funcionais ocupadas de um edifício retangular estar orientadas para Norte ou Sul ^{[38] [40]}. Este enquadramento é aplicável ao território que se pretende estudar, Dakar, no Senegal cujas coordenadas geográficas são WGS84 14° 41' 34" N, 17° 26' 48" O ^[41].

A orientação mais adequada para proteger o edifício da radiação solar seria coincidente com a orientação favorável à captação dos ventos e brisas, no entanto, nem sempre é possível compatibilizar estes dois elementos devendo ser dada prioridade à geometria solar, uma vez que

a direção do vento ou brisas pode ser alterada mediante a disposição certa de alguns elementos exteriores. No entanto, no caso de edifício baixos a orientação segundo os ventos dominantes é mais importante porque as paredes não recebem muita radiação^{[38] [40]}.

3.1.3 Envolvente opaca

A envolvente opaca é o conjunto das paredes, cobertura e pavimentos que definem a envolvente exterior e interior de um edifício ou fração autónoma^[33]. A radiação solar que incide na envolvente de um edifício é parcialmente refletida, sendo a restante absorvida, e os respetivos valores dependem de propriedades dos materiais tais como a densidade, resistência térmica, calor específico, propriedades radiativas e ainda espessura^[42] e cor, sendo as superfícies claras e brilhantes, como as superfícies metálicas, as mais refletoras. A restante radiação recebida é absorvida pelo material, convertida em calor^{[40] [43]}, e se não for removida de alguma forma irá aquecer o interior dos edifícios. A seleção cuidada dos materiais, das cores dos acabamentos finais das superfícies exteriores, da espessura das paredes e dos pavimentos, desempenham um papel fundamental na forma como o edifício capta, distribui e armazena a energia, permitindo reduzir os ganhos internos de calor no interior das habitações, evitando que as temperaturas internas se aproximem das exteriores, que é o que se pretende nos climas quentes^[44].

O conceito de inércia térmica caracteriza a resistência oferecida pelos sistemas térmicos à tentativa de alterar o seu estado termodinâmico, e tem origem na capacidade, que os materiais possuem, de armazenar calor. A utilização de um nível de inércia elevado nos edifícios pode assim contribuir para prevenir contra os fenómenos de sobreaquecimento^[44].

A inércia térmica é um parâmetro muito importante para o balanço térmico de um edifício e relaciona-se com a capacidade que um elemento possui para armazenar calor e apenas libertá-lo ao fim de algum tempo. Permite absorver energia proveniente dos ganhos solares durante o dia e libertá-la à noite reduzindo, deste modo, a carga de aquecimento de um edifício. Esta capacidade depende de algumas características como a massa dos elementos de construção, do calor específico e também da sua condutibilidade térmica^[45]. A inércia térmica é uma característica que contribui para uma maior estabilização das temperaturas interiores relativamente às

temperaturas oscilatórias no exterior permitindo, assim, a diminuição de custos de energia para a climatização dos espaços ^[45].

O isolamento é parte integrante da envolvente opaca e fornece o limite térmico nas paredes, no teto e nas fundações de uma casa, bloqueando a perda de calor por condução, existindo uma grande variedade destes materiais. Um edifício que tenha coeficiente de transmissão térmico baixo reduzirá todas as formas de transferência de calor por condução através da envolvente do edifício ^[40]. Este fluxo de calor estabelecido por condução é elevado quando a diferença de temperatura entre o interior e o exterior é grande, caso contrário, o fluxo de calor é pequeno em ambos os sentidos, não se verificando, neste caso, qualquer redução significativa do fluxo com o aumento do isolamento térmico. Nas regiões quentes e húmidas o consumo de energia para arrefecimento diminui apenas após a adição da camada de isolamento com 40 mm de espessura, sendo esta diminuição insignificante ^[38].

Análises relativas a paredes exteriores e telhados em regiões tropicais e subtropicais, recorrendo a simulações térmicas, permitiram avaliar as necessidades energéticas para arrefecimento dos edifícios, com base num cenário de referência, e avaliar a influência do isolamento térmico nessas mesmas necessidades ^[38].

De acordo com os estudos de *Hindrichs* e *Daniels* ^[38], as paredes duplas com caixa-de-ar ventilada são as que permitem reduzir mais o consumo de energia, apesar de este ser mínimo. As paredes duplas com caixa-de-ar não ventilada permitem poupar mais energia do que os telhados duplos com o espaço de ar ventilado, e este tipo de elementos tem melhores resultados nas regiões quentes e áridas do que nas regiões quentes e húmidas ^[38]. Uma envolvente maciça e pesada funciona como volante térmico, acumulando o calor durante o dia, com temperaturas elevadas, e só o dissipa durante a noite ^[38].

Ao contrário do que acontece para a radiação direta, na radiação difusa a orientação de uma superfície é indiferente, uma vez que esta vem de todas as direções ^[12]. Em certas zonas onde o pavimento tem cores claras e superfícies refletoras, a componente refletora pode ser tão importante como a reflexão do céu. Num clima tropical a radiação difusa constitui mais um ganho térmico indesejado ^[12]. A pedra, o tijolo, a cerâmica e o cimento são os materiais mais indicados para os pavimentos das casas em climas tropicais húmidos, pois são mais frescos ^[27]. Os

elementos da paisagem incluindo vários tipos de materiais rijos e macios, podem absorver a radiação, atuando como isolamento térmico. Devem ser reduzidas ao máximo as superfícies coletoras de calor e, por isso, o pavimento exterior deve ser coberto com relva e sombreado com alguns elementos e árvores. São preferíveis cores claras em superfícies rugosas (ásperas) verticais e horizontais, uma vez que reduzem a absorção de calor e a re-radiação. As caves também facultam o arrefecimento pois no Verão o subsolo está mais fresco que a superfície.

Numa tentativa de melhorar o comportamento térmico dos edifícios através de estratégias essencialmente passivas, têm sido desenvolvidos vários estudos utilizando materiais com propriedades de armazenamento de energia, os materiais de mudança de fase. Os PCMs ou *phase change materials* são substâncias com elevado calor de fusão e solidificação a uma determinada temperatura e que podem armazenar e libertar grande quantidade de energia térmica a uma determinada temperatura de mudança de fase. A energia térmica é absorvida ou libertada conforme o material muda de fase de sólido para líquido ou de líquido para sólido ^[46]. Os PCMs podem ser incorporados no revestimento ou estrutura de um edifício de forma a alcançar o conforto térmico permitindo o retardamento da transferência de calor, absorvendo a energia térmica em excesso para a restituir mais tarde quando houver necessidades de aquecimento ^[47]. Estes materiais começaram a ser considerados para o armazenamento térmico em edifícios antes de 1980 e passaram a ser usados como parte integrante dos edifícios em sistemas de aquecimento e arrefecimento, aplicados em paredes de *Trombe*, paredes de gesso, sob o piso e em placas de teto, em estores em sistemas de climatização ^[46]. O exemplo mais bem-sucedido de PCMs são as parafinas micro encapsuladas produzidas e comercializadas na Alemanha e que podem ser dispersas em rebocos de revestimentos ou usadas em placas de *pladur*, existindo também estudos com vista à aplicação de PCMs de parafina em sistemas de aquecimento por piso radiante ^[47]. As microesferas de parafina também podem ser incorporadas em vidros, paredes, tetos, etc, ^[48] ^[49]. Os PCMs devem ter propriedades térmicas e físicas, propriedades químicas e também cinéticas, adequadas conforme descrito na tabela seguinte, e têm que ser compatíveis com os materiais de construção ^[49].

Tabela 1 – Propriedades dos materiais de mudança de fase (PCMs).

Propriedades térmicas e físicas	Propriedades químicas	Propriedades cinéticas
Temperatura de fusão do PCM deve estar no intervalo de temperatura operacional desejada.	Devem ter uma estabilidade química a longo prazo.	Não deve ocorrer super-arrefecimento ou sub-arrefecimento durante os processos de liquefação e solidificação.
A condutividade térmica deve ser elevada para ajudar no carregamento de PCM dentro do período de tempo limitado.		
Devem ter mais calor latente por unidade de volume: assim o tamanho de armazenamento para armazenar a quantidade de energia será menor.	Devem ser não-corrosivos com o recipiente ou invólucro. Os PCMs orgânicos de parafinas são os mais usados.	
Deve ter a capacidade de calor específico elevada, que pode ser benéfico para o armazenamento adicional de calor sensível.	Devem ser não-tóxicos, não-inflamáveis e não-explosivos.	Devem ter alta velocidade de cristalização.
Deve haver pequenas variações de volume durante o processo de mudança de fase para prevenir a expansão térmica dos recipientes.		

3.1.3.1 Integração de paredes de *Trombe*

Os sistemas solares passivos para aquecimento, podem ser classificados em sistemas de ganho direto ^[50] (paredes ou janelas orientados a Sul (para o hemisfério Norte)), ganho indireto (paredes de armazenamento térmico, cobertura com armazenamento térmico, estufas), e de ganho isolado.

A parede de *Trombe* é o exemplo de parede de armazenamento térmico mais comum, foi desenvolvida em 1881 por *Edward Morse* e divulgada em 1967 pelo engenheiro francês *Félix Trombe* e pelo arquiteto *Jacques Michel* através da construção da “casa-Trombe” em *Odeillo*,

França, sendo atualmente uma solução construtiva muito utilizada nos projetos solares passivos^[51]. Consiste num sistema de ganhos indiretos composto por uma parede com elevada inércia térmica, integrada habitualmente na envolvente exterior dos edifícios e constituída por um envidraçado orientado a Sul, em espaços onde se deseja rentabilizar os ganhos solares durante a estação de Inverno, como por exemplo os quartos, aproveitando o seu calor transmitido para o interior da habitação durante a noite. A radiação solar atinge a parede de elevada inércia térmica aquecendo-a. O calor absorvido pela parede é, posteriormente, transferido lentamente para o interior da habitação por condução, imediata ou desfasadamente, dependendo da solução de ventilação (ou não) que for adotada^[51]. A superfície exterior da parede deverá conter uma película seletiva de baixa emissividade ou uma pintura de cor escura para aumentar a absorção da radiação solar incidente na mesma^[51].

O sistema de parede de *Trombe* possui duas opções distintas de funcionamento (não ventilada e ventilada):

A não ventilada é adequada para espaços com ocupação noturna pois a transferência de calor através da mesma tem a duração de várias horas. Neste sistema, os raios solares atravessam o envidraçado situado na superfície exterior da parede *Trombe* não ventilada e aquecem a zona de armazenamento de calor, o qual se acumula neste espaço e vai, progressivamente aquecendo a parede transferindo-se mais tarde, por condução, para o interior da habitação. O tempo que o mesmo demora a ser transferido para o interior depende da espessura e do material da parede^[51]. Os materiais de armazenamento e construção utilizados nestes sistemas, devem ter capacidade térmica elevada para armazenar energia durante o dia e libertá-la à noite. A fim de evitar os problemas de sobreaquecimento na estação de arrefecimento, impõe-se a introdução de uma pala de sombreamento no sistema. Existem alguns fatores que contribuem diretamente para o desempenho da parede de *Trombe* não ventilada, nomeadamente o fator de obstrução pequeno no Inverno e grande no Verão (através da introdução de palas de sombreamento, persianas ou colocação de árvores de folha caduca na zona circundante), o envidraçado exterior dotado de transmissividade elevada e o coeficiente de absorção solar da superfície exterior elevado (através da aplicação de pintura de cor preta ou uma película seletiva com baixa emissividade).

A utilização da solução de paredes *Trombe* com ventilação é adequada para edifícios de ocupação diurna porque o calor é transmitido para o interior da habitação mais rapidamente comparativamente com as paredes *Trombe* sem ventilação. Este sistema possui aberturas na sua

parte inferior e superior onde se efetuam trocas de circulação de ar permitindo assim que estas contribuam para o aquecimento. A radiação solar atravessa o envidraçado situado na superfície exterior da parede de *Trombe*, aquecendo-a. O calor absorvido pela parede é transmitido posteriormente por condução e convecção caso os orifícios estejam abertos, ou apenas por condução, caso os orifícios estejam fechados. Deve ser previsto, nas aberturas de ventilação, a instalação de sistemas que possibilitem o controlo do fluxo permitindo, deste modo, controlar as temperaturas interiores evitando condições de sobreaquecimento durante o dia ^[51].

O funcionamento correto deste sistema é muito importante para o seu desempenho. Na estação de aquecimento, quando é necessário aquecer o interior da habitação, a abertura da ventilação inferior permite a entrada de ar frio que, ao aquecer na caixa-de-ar entre o envidraçado e a parede, diminui a sua densidade e sobe até sair pela abertura de ventilação superior da parede aquecendo, deste modo, o espaço interior da habitação através de um sistema de circulação de ar interior. Nesta estação de aquecimento o dispositivo de sombreamento deve estar aberto para maximizar a absorção de radiação solar e no Verão as aberturas de ventilação devem estar fechadas e deverá ser previsto o sombreamento do sistema com o objetivo de minimizar a radiação incidente no envidraçado.

A parede de *Trombe* apresenta algumas vantagens pois consiste num sistema simples sem peças móveis, que não exige manutenção, e é relativamente fácil de incorporar na estrutura de um edifício. Além disso os materiais são relativamente baratos e pode reduzir substancialmente os consumos energéticos com o aquecimento ^[52]. No entanto, este sistema solar passivo é indutor de ganhos de calor indesejados e fenómenos de sobreaquecimento, durante os períodos quentes, situação que pode ser desvantajosa para o clima tropical que se pretende estudar caracterizado por temperaturas médias anuais bastante elevadas. Outra desvantagem é que os dias nublados prolongados de Inverno, originam perdas de calor, devido à inversão do fluxo de calor e, portanto, desconforto para os ocupantes. Para contrariar os ganhos solares excessivos durante períodos quentes, a parede de *Trombe* deve ser orientada corretamente e possuir soluções de sombreamento eficazes por exemplo palas de sombreamento ou persianas. O uso de proteções solares e de ventilação cruzada estão entre as soluções sugeridas para melhorar o desempenho e prevenir o sobreaquecimento durante o Verão.

3.1.4 Envolvente envidraçada

A envolvente envidraçada separa o ambiente exterior dos espaços interiores úteis dos edifícios ou frações autónomas, através dos vãos envidraçados, cuja função num edifício é permitir o contacto visual com o exterior, a entrada de iluminação e a ventilação natural.

A radiação solar direta, difusa ou refletida, que penetra no interior dos edifícios através dos vãos envidraçados promove o aquecimento dos espaços, pois os vidros são quase transparentes à radiação infravermelha de onda curta emitida pelo sol, sendo praticamente opacos à radiação de onda larga emitida pelos objetos existentes no interior da habitação, ficando o calor retido no interior do edifício aumentando a temperatura interior, e contribuindo para o desconforto dos ocupantes ^{[12] [40]}.

O desempenho de um vão envidraçado em termos de conforto depende da sua geometria, da geometria do espaço, da localização do ocupante dentro do espaço, do tipo de vidro e do caixilho. Depende também das condições exteriores (temperatura de bolbo seco, vento, sol), condições interiores (Tar, humidade relativa, velocidade do ar) e fatores humanos (roupa, taxa metabólica, localização) ^[53].

Os parâmetros mais importantes no dimensionamento de envidraçados com desempenho energético adequado são o coeficiente de transmissão térmica ou fator-U, fator solar ou o fator-g que é o quociente entre a energia solar transmitida através do vidro para o interior e a energia solar nele incidente, e o coeficiente de transmissão visível ou fator-TV, que é a percentagem da luz visível que atinge um envidraçado e que passa para o interior. Em termos práticos os valores dos fatores de transmissão luminosa podem oscilar entre os 5% (vidro duplo de cor azul) os 90% (vidro simples incolor) ^[53]. Outros parâmetros que caracterizam o comportamento térmico dos envidraçados são o coeficiente de reflexão visível, (TRV), que indica em que grau um determinado vidro se comporta como um espelho e o coeficiente de seletividade espectral (CSE), (referente à capacidade de um determinado material envidraçado responder de modo diferente à radiação de diferentes comprimentos de onda) ^[53].

A seguir apresentam-se os principais tipos de vidros e os valores dos parâmetros mais relevantes que só são válidos para o centro dos vidros, e que não servem para avaliar a totalidade do vão envidraçado.

Tabela 2 – Tipologias de vidros e propriedades ^[53].

		Fator -U $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	Fator -g	Fator TV
Tipologia de vidros (exclui caixilhos)	Simplex incolor	6	0,86	0,9
	Simplex colorido	6	0,73	0,68
	Duplo incolor	6	0,73	0,68
	Duplo colorido	2,8	0,63	0,61
	Duplo colorido de alto desempenho	2,8	0,51	0,69
	Duplo refletivo	2,3	0,17	0,13
	Duplo baixo emissivo - <i>low E+</i> (alto ganho solar)	1,65	0,71	0,75
	Duplo baixo emissivo - <i>low E</i> (ganho moderado)	1,71	0,58	0,78
	Duplo baixo emissivo - <i>low E-</i> (baixo ganho solar)	0,75	0,39	0,71
	Multicamada triplo (3 vidro)	1,76	0,61	0,70
	Multicamada triplo (2 vidros + 1 filme)	0,85	0,26	0,46
	Quadruplo (2 vidros + 2 filmes)	0,45	0,24	0,42

A caixilharia é o elemento de transição entre as áreas opacas e as áreas envidraçadas e serve para garantir a estanquicidade e a operacionalidade dos vãos, contribuindo para a otimização do desempenho energético do edifício. Com uma caixilharia mais estanque as renovações de ar essenciais para assegurar a qualidade do ar interior podem ser conseguidas por ventilação natural, através de grelhas de ventilação incorporadas no vão envidraçado ou de uma ventilação mecânica adequada ^[53].

A escolha das caixilharias é determinante para a avaliação do comportamento total do envidraçado. Alguns tipos principais de materiais e combinações disponíveis no mercado para o fabrico de caixilharias estão resumidos na tabela seguinte, sendo a informação presente a média de produtos similares de diferentes fabricantes ^[53]:

Tabela 3 – Caixilharias para janelas e respetivos coeficientes de transmissão térmica.

Material	Coeficientes de transmissão térmica Fator – U
Alumínio	4,31
Alumínio com rutura térmica	3,58
Madeira	2,78
Madeira com capa	2,78
PVC	2,78
Combinado	2,78
PVC isolado	2,5
Fibra de vidro	2,5

Os vãos envidraçados devem permitir controlar as perdas de calor e os ganhos solares e para tal nos climas quentes é preferível uma janela com fator U mais elevado e um fator-g mais baixo pois este é o parâmetro indicador da capacidade da janela bloquear a entrada de calor ^[42]. No entanto, o fator U das janelas (envidraçado mais caixilharia), não deve ultrapassar o limite de $0,8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ assim como o coeficiente de ganhos solares não deve ser superior a 50%. Para vidros duplos o U não devia exceder $0,75 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ^[53], valor difícil de obter nesta tipologia de envidraçados.

Foi realizado um estudo sobre a aplicação de vários tipos de janelas em três edifícios localizados em *Chennai*, na Índia ^[34]. *Chennai* é perto do Equador ($13^{\circ} 00' \text{N}$, $80^{\circ} 11' \text{E}$), e requer refrigeração durante todo o ano. Em média, a energia poupada em edifícios com janelas de controlo solar (vidro duplo de 6mm, reflexivo, claro, com espaçamento de 12 mm, com fator U = $1,95 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ e fator g = 0,1), relativamente a uma janela base (vidro simples incolor de 6mm com fator U = 5,65 e fator g = 0,83), foi de 10% em todas as orientações, Sul Este e Oeste e de 7% para Norte, num edifício convencional. Num edifício com isolamento moderado a energia economizada foi 14% para as orientações Sul, Este e Oeste e no máximo 10% na orientação Norte. Num edifício bem isolado os valores subiram para 23% para as janelas orientadas a Sul, Este e Oeste e 17% para

Norte. Este estudo comprova o que foi referido no parágrafo anterior, no que diz respeito a ser preferível ter um fator U mais elevado e um fator g inferior.

As camadas de vidro devem ser seguras separadamente à distância apropriada através do perfil separador ^[53]. O alumínio tem sido o material mais usado, no entanto reduz os benefícios dos envidraçados por ser um excelente condutor térmico. Têm sido desenvolvidos perfis inovadores, projetados para interromper o caminho da transferência de calor para a extremidade do envidraçado, isto é, com propriedades isolantes. Para determinar o fator-U da janela a contribuição da largura do perfil é mais importante em janelas menores que têm proporcionalmente uma área de largura maior. Numa janela residencial de tamanho típico, mudar de um perfil de alumínio *standard* para um perfil de alto desempenho, resulta numa redução do fator-U global da janela aproximadamente $0,10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ^[53].

Os envidraçados devem ser otimizados também em termos de permeabilidade ao ar que deve ser reduzida para evitar perdas e ganhos por ventilação indesejada através das juntas caixilho/vidro. Além disso a condensação superficial também deve ser evitada pois diminui a visibilidade, reduz a intensidade da iluminação natural e aumenta a deterioração dos objetos interiores ^[53].

A conjugação perfeita do conforto ótico e térmico é o que se pretende numa janela, no entanto, não é possível diminuir a transmissão de radiação total abaixo de 50% (aconselhado em climas quentes), sem afetar a transmissão de luz, pois a gama de seletividade de transmissão entre luz e calor é limitado pelo facto de que 53% de toda energia na radiação solar está no espectro visível ^[53].

Algumas das tecnologias emergentes de janelas são a adição de isolamento, as janelas de vácuo, inteligentes, fotocromáticas, electrocromáticas, termocromáticas, de cristal líquido, SPD, e janelas gasocromáticas ^[53].

Em janelas com mais de uma camada de vidro podem ser aplicados gases que são maus condutores de calor e são mais densos, conferindo um poder isolante consideravelmente superior. São aplicados gases raros como o Árgon, o Criptón e o Xénon que não afetam a transmissão luminosa e que são muito utilizados na indústria do vidro duplo. O vidro duplo de baixa emissividade, preenchido com Árgon representa uma melhoria de 40% na capacidade de

isolamento relativamente ao vidro duplo convencional. O preenchimento com Árgon por si só, independentemente do tipo de vidro duplo empregue possibilita uma melhoria de 15% na capacidade de isolamento ^[53].

Do ponto de vista térmico, a proteção solar deve ser feita através de elementos construtivos sombreadores no exterior dos envidraçados, de forma a aumentar a eficácia de sombreamento. “A utilização de estores interiores não reduz mais de 20% os consumos energéticos para arrefecimento” ^[54]. Existe uma grande variedade de elementos de proteção que são aplicados no exterior de vãos envidraçados para reduzir ou controlar a incidência da radiação solar (palas, beirados, toldos, portadas, venezianas, persianas, estores de enrolar, estores metálicos orientáveis), mas nem todos estes sistemas salvaguardam os aspetos qualitativos ou estéticos pretendidos. A proteção também pode ser feita pelo interior mas é pouco eficaz porque neste caso a radiação solar será absorvida pelo vidro e alcançará a proteção para ser parcialmente absorvida e parcialmente refletida ^[53].

O sombreamento também pode ser fornecido através de plantação intencional ou da preservação de árvores existentes no local, sendo as árvores nativas as mais benéficas para o ambiente. As árvores reduzem os requisitos de arrefecimento, particularmente quando localizadas a Sul, Este e Oeste. A minimização dos ganhos solares em zonas próximas do Equador passa por orientar os envidraçados a Sul, concedendo um cuidado especial às aberturas orientadas a Este e principalmente a Oeste, uma vez que a intensidade máxima coincide com a parte mais quente do dia ^[40]. A fenestração pode ser reduzida a pequenas frestas dispostas junto ao teto, impedindo a entrada do sol ^[52], mas devem existir janelas em fachadas opostas para promover a ventilação natural, bastante recomendada para os climas quentes.

3.1.5 Tipos de cobertura

A performance de um telhado depende da massa térmica, do isolamento, da geometria, cor exterior e da ventilação. Todos estes fatores podem contribuir para a redução dos requisitos de energia de arrefecimento e grau de desconforto num edifício, sendo o isolamento o contributo mais determinante ^[55].

Nas regiões próximas do Equador a radiação solar é mais intensa na superfície horizontal de um edifício do que nas paredes, logo, durante o dia, grande parte do calor será transferido para o interior através das coberturas, principalmente se estas estiverem desprotegidas, da mesma forma que, durante a noite se acentuarão as perdas devido ao arrefecimento rápido, sendo, por isso, muito importante isolar as coberturas das habitações ^[56].

Os telhados planos não são indicados para climas quentes e húmidos devido ao sobreaquecimento e também por causa da acumulação de água que pode originar humidade excessiva dentro das habitações, no entanto, a plantação de relva nestas coberturas pode solucionar o problema do excesso de água ^[27]. Os telhados inclinados também são mais indicados para minimizar o aquecimento dos materiais. No entanto, se o telhado não for inclinado pode-se aplicar uma cobertura de água com isolamento para que esta não aqueça com o calor. No caso das coberturas de água, existe a vantagem adicional que, devido à grande superfície de radiação de calor, os efeitos de aquecimento e refrigeração são mais uniformes que no caso das paredes.

3.1.5.1 Coberturas refletantes

As coberturas devem estar protegidas com isolantes térmicos refletivos ou barreiras radiantes, elementos que reduzem a transferência de calor por radiação, proporcionando uma redução dos ganhos térmicos no Verão e as perdas de calor no Inverno.

A transferência de calor depende da direção e sentido do seu fluxo que pode ser ascendente, descendente ou horizontal, e num estudo realizado por *Desjarlais* e *Tye* ^[57] verificou-se que o calor é maioritariamente transmitido através de um espaço por radiação, especialmente durante o fluxo descendente, situação que corresponde frequentemente a uma cobertura, num período

diurno em condições de Verão. No fluxo descendente não ocorre convecção e o fluxo por condução é mínimo. Daqui verifica-se que a aplicação de proteções térmicas refletantes deverá predominar em regiões com uma forte insolação, como é o caso da zona em estudo, próxima do Equador.

Convencionalmente as coberturas são protegidas com isolamento térmico, mas em alternativa podem ser aplicados revestimentos de controlo de radiação, sobre a superfície exterior da cobertura^[55], com refletância elevada relativamente à radiação solar e reduzida emissividade face à incidência de radiação infravermelha. Os revestimentos de controlo de radiação podem ser emulsões de asfalto, resinas ou tintas e são aplicados na fase líquida, normalmente sobre revestimentos de impermeabilização de coberturas.

A utilização mais correta de proteções refletantes, de modo a conferir um bom desempenho térmico à cobertura, implica que a superfície refletante, ou pelo menos uma das superfícies refletantes (se ambas o forem), esteja em contacto com um espaço de ar^[55].

As barreiras radiantes são outro tipo de proteção térmica refletante que deve ser aplicada pelo interior da cobertura^[55]. O seu desempenho depende da refletividade, emissividade e ângulo de radiação. Quanto maior for a diferença de temperatura entre os lados do material, maiores serão os benefícios que uma barreira radiante pode oferecer e estas podem ser combinadas com vários materiais de isolamento, se não forem suficientemente eficazes. Estas combinações são chamadas de sistemas de isolamento refletivo^[58]. Estas barreiras são constituídas por uma ou mais folhas altamente refletantes, e são geralmente de alumínio ou *poliéster* metalizado^[55], podendo ser combinadas de diversas formas (com folha de papel *Kraft*, com uma rede de reforço, com polietileno alveolar ou extrudido), em conjunto com um isolamento térmico convencional ou várias folhas separadas por espaços de ar fechados^[59]. A aplicação de proteções térmicas refletantes em coberturas poderá ser efetuada^[55]:

- Diretamente sob o revestimento exterior, assente sobre a estrutura de suporte da cobertura, com a superfície refletante exposta para o desvão da cobertura;
- Sob a estrutura de suporte da cobertura: idealmente a proteção térmica deverá ser refletante em ambas as faces: caso possua apenas uma face refletante, esta deverá ser voltada para o revestimento exterior;

- Sobre a esteira horizontal com a superfície refletante, (se o desvão não for habitado) exposta para o desvão. (Não é recomendado pois favorece o aparecimento de condensações (o que pode ser solucionado com a perfuração da superfície refletante) ^[55], e acumulação de sujidade, o que reduz a emissividade) ^[60].

As proteções térmicas refletantes são de aplicação simples e rápida, reduzindo o custo de mão-de-obra ^[61] e podem ser aplicadas em edifícios em construção ou em fase de reabilitação ^[55]. Este tipo de material também funciona como barreira para- vapor, pois bloqueia o fluxo de vapor de água, e tem taxas de absorção de humidade muito reduzidas em comparação com os isolamentos comuns ^[59] ^[62].

Cheikh et al, ^[63] desenvolveu um modelo matemático dinâmico para um telhado evapo-reflexivo usado para melhorar a refrigeração do espaço em edifícios em climas quentes e áridos. O telhado proposto era composto por um teto de betão sobre qual se instalou um leito de pedras numa piscina de água, e sobre o qual existia um espaço de ar separado do ambiente exterior por uma placa de alumínio. A superfície superior desta placa foi pintada com um pigmento à base de titânio branco para aumentar a reflexão da radiação até um máximo durante o dia. Durante a noite, a temperatura da folha de alumínio caía abaixo da temperatura do leito de rocha misturada com água. O vapor de água condensava no interior do telhado e caía por gravidade. Este efeito tubo de calor trazia calor para fora e frio para dentro. A troca de calor foi melhorada por radiação entre duas superfícies interiores húmidas. Foi comparada a eficácia deste sistema de refrigeração, com um telhado nu e os resultados mostraram que o arrefecimento no interior de edifícios pode ser melhorado através dos telhados evapo-reflexivos. Verificou-se também que a combinação de telhados evapo-reflexivos com ventilação noturna aumenta significativamente o arrefecimento.

3.1.5.2 Coberturas ajardinadas

Em dias quentes de Verão a vegetação atua como um refrigerador evaporativo natural, diminuindo as temperaturas elevadas ^[64].

Cobertura verde, ajardinada ou ecológica é toda a estrutura de telhado ou cobertura que integra na sua composição uma camada de solo e outra de vegetação, uma vez que o seu sistema construtivo se baseia numa técnica de aplicação de camadas ^[65].

Os *Vikings* empregavam nas paredes e nas coberturas das suas casas camadas de relva para se protegerem das chuvas e dos ventos, e às vezes usavam algas marinhas para isolar a cobertura ^[65]. Na arquitetura moderna contemporânea, a aplicação de vegetação em coberturas está associada aos arquitetos famosos, *Le Corbusier* e *Frank Lloyd Wright* ^[66], tendo sido também adotada pelo arquiteto das ilhas Faroé, *Kári Thomsen*, em casas pré-fabricadas de baixo consumo energético, as *Easy Domes*, com o primeiro exemplar construído em *Tórshavn*, capital das Ilhas Faroé, na Dinamarca, em 1992. Estas casas foram expandidas até ao Golfo Pérsico, destinadas a uma estância de férias em *Abu Dhabi*, em 2008.

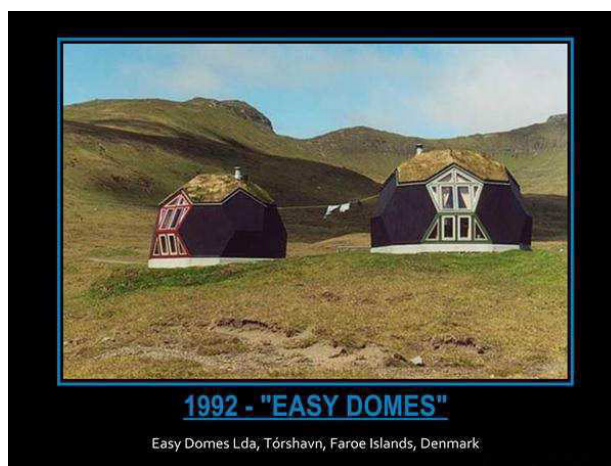


Figura 11 – Easy Domes^[3].

Os sistemas de coberturas verdes podem ser intensivos ou extensivos. Os primeiros são caracterizados por terem uma camada de solo bastante profunda, um sistema de irrigação e uma manutenção rigorosa, apresentando as vantagens de permitirem mais diversidade de plantas, boas propriedades de isolamento e de serem mais atrativos, além de permitirem o cultivo de alimentos. Já os sistemas extensivos são caracterizados por terem uma camada de solo fina, plantas resistentes e pouca manutenção. São apropriados para coberturas com inclinação de zero a 30° e não precisam de sistema de irrigação nem de manutenção técnica. Permitem o desenvolvimento espontâneo da vegetação natural e enquadrada na paisagem com custos relativamente baixos. Portanto, o sistema extensivo é mais adequado para casas pré-fabricadas de baixo custo destinadas ao clima tropical.

As coberturas verdes extensivas são constituídas por oito camadas por ordem ascendente ^[67]:

- 1- Suporte estrutural;
- 2- Camada impermeabilizante sendo utilizados diferentes tipos betuminosos ou sintéticos, cuja função é proteger o suporte estrutural contra infiltrações;
- 3- Camada de separação ou isolamento térmico que é escolhido em função da transmitância térmica;
- 4- Proteção contra raízes, mais utilizada quando as coberturas têm árvores, constituída por painéis absorventes de materiais sintéticos;
- 5- Camada drenante, que pode ser em brita, seixos rolados ou argila em camadas de 7 a 10 cm e que serve para drenar as águas da chuva;
- 6- Filtro para evitar o arraste de partículas pelas águas da chuva ou rega, e que deve ser geotêxtil;
- 7- Solo/ terra vegetal, devendo ser utilizado substrato argiloso;
- 8- Vegetação (as plantas nativas são as mais indicadas).

Em estudos sobre coberturas vegetais extensivas, em cidades de clima tropical, *Laar* ^[68] analisou algumas espécies de plantas e identificou a *Portulaca grandiflora*, a *Tradescantia pallida*, a *Asparagus densiflorus* e *Senecio confusus* como sendo aquelas que apresentaram melhores condições de adaptação.



Figura 12 – Plantas utilizadas em coberturas vegetais^[69].

Existem diversos estudos sobre o desempenho de coberturas vegetais em termos de poupanças energéticas na climatização e de uma forma generalizada verificam-se poupanças ao nível do arrefecimento e aquecimento dos edifícios, comparativamente com as coberturas convencionais. *Jeff Sonne and Danny Parker* ^[69], no estudo feito num edifício Universitário na Flórida, Estados Unidos da América verificaram um desempenho mais satisfatório da cobertura verde, relativamente à convencional, a qual se manteve mais estável e resistente às flutuações térmicas diárias, tanto no Inverno como no Verão. Também *Wong* ^[70] ao avaliar o impacte quantitativo da cobertura no consumo energético de edifícios comerciais em Singapura registou uma redução de 15% do consumo energético anual. Outro estudo realizado por *Wong* ^[71] sobre a influência das plantas das coberturas verdes, na diminuição das temperaturas de superfície, redução de ganhos de calor e variações térmicas permitiu confirmar que as coberturas verdes são termicamente benéficas tanto para o edifício como para a sua envolvente. Em *Thessaloniki*, Grécia, *Eumorfopoulou e Aravantinos* ^[72] avaliaram o comportamento térmico de coberturas verdes, e também concluíram que estas contribuem para um melhor desempenho térmico dos edifícios, reduzindo a radiação solar e as variações térmicas diárias.

Um outro estudo realizado no Togo ^[73], país Africano com clima equatorial, no qual foi desenvolvido um modelo para avaliar o potencial de arrefecimento de um telhado verde, demonstrou que esta constitui uma técnica de arrefecimento passivo que reduz a carga térmica dos edifícios. O trabalho permitiu ainda concluir que a evolução diurna do fator de ganhos solares, demonstra que a presença do dossel vegetal limita a penetração do fluxo solar de acordo com o índice de área foliar. Maior índice de área foliar e boa ventilação no dossel vegetal reduzem o fator de ganhos de calor solar abaixo do valor aceitável de 4%. É claramente comprovado que a densidade da folhagem e por isso a seleção do tipo de dossel vegetal influenciam bastante a eficiência térmica da tela de isolamento bioclimático. Verificou-se que um maior índice de área da folha reduz a penetração do fluxo solar, estabiliza a flutuação dos valores, e reduz a temperatura do ar interior.

As coberturas verdes retêm parte das águas pluviais incidentes e também atuam como filtro destas águas que podem ser reaproveitadas, podendo ser, também por esta razão, uma solução viável para o clima em análise neste estudo.

3.1.6 Ventilação

A ventilação é geralmente definida como o fornecimento de ar do lado de fora do edifício no movimento do ar interior, que permite a substituição do ar expelido por ar fresco exterior ^[74]. As técnicas de ventilação são utilizadas para melhorar a qualidade do ar interior e as condições de conforto dos edifícios. Um dos principais propósitos da ventilação em edifícios localizados em regiões com clima tropical é proporcionar o arrefecimento fisiológico dos ocupantes através da introdução de ar fresco do ambiente no seu interior. O arrefecimento fisiológico pode ser conseguido através da abertura de janelas ou portas, por meio de ventilação transversal ou por ventiladores para introduzir o ar no interior a uma velocidade mais elevada. O arrefecimento fisiológico é normalmente utilizado quando a temperatura ambiente é inferior à temperatura interior ^[57].

O arrefecimento passivo dos edifícios refere-se a tecnologias que são utilizadas para arrefecer o interior do edifício, sem ou com utilização de eletricidade mínima. Segundo alguns investigadores o termo "passivo" não exclui as tecnologias de refrigeração ou técnicas que utilizam ventilador ou bomba quando a sua aplicação possa melhorar o desempenho de refrigeração ^[57].

O arrefecimento evaporativo é uma das tecnologias para o arrefecimento do ar por evaporação da água. Quando a água se evapora, absorve o calor do ar ambiente que consequentemente arrefece. Esta técnica é mais adequada para climas quentes e secos. No entanto, se o arrefecimento evaporativo do ar for indireto, será evitado o aumento da humidade do ar através da separação da água e do ar, o que o torna mais atrativo para climas húmidos ^[57].

Outras técnicas de arrefecimento passivo são o arrefecimento através do solo, baseada no arrefecimento de ar pelo subsolo onde a temperatura é muito mais baixa. O aspirador estático, baseado no efeito *Venturi*, é outro sistema que gera movimento de ar no interior do espaço, a partir de uma extração de ar pela cobertura, combinada com entrada do ar de renovação pela parte inferior do circuito, para assegurar o funcionamento correto do sistema. É um sistema de ventilação aplicável a climas temperados e quentes, para favorecer a refrigeração, mas deve ser utilizado em zonas com ventos constantes. A torre de vento consiste na introdução de ar exterior no ambiente interior, efetuada através de uma torre que se eleva a uma altura suficiente da cobertura do edifício, recolhendo o vento onde este é mais intenso. O ar captado é conduzido para a parte mais baixa do edifício mediante condutas e podem gerar-se até 3 a 6 renovações por

hora. Este tipo de torres têm a vantagem de se poder combinar com diferentes sistemas de tratamento de ar, assim como, sistemas de extração. Em geral este é um sistema válido para climas quentes, com ventos frequentes e intensos, já que o sistema depende basicamente desta característica climática.

As chaminés solares são outra tecnologia aplicada para reduzir ganhos de calor e para induzir o arrefecimento natural em edifícios por causa dos seus potenciais benefícios em termos de custos operacionais, consumo de energia e de emissão de dióxido de carbono. A tecnologia da chaminé solar é muito adequado para regiões onde a irradiação solar é elevada e a velocidade do vento é normalmente baixa. Nos climas quentes e húmidos, as torres de ventilação são ineficientes devido à pequena diferença de temperatura entre o interior e o exterior dos edifícios naturalmente ventilados. Por isso, a ventilação solar induzida por chaminés de energia solar é uma alternativa viável para o aperfeiçoamento da ventilação por torre de vento ^[75]. *Khedari et al.* relatou que uma casa com chaminé solar num clima quente, dependendo das condições operacionais, consumia menos 10-20% de energia elétrica em comparação com uma casa comum. De qualquer forma, a tecnologia da chaminé solar tem sido considerada como um método de projeto eficaz e económico em edifícios de baixo carbono. A fim de se obter o arrefecimento natural desejado, é interessante combinar as chaminés solares com sistemas de arrefecimento naturais incluindo arrefecimento evaporativo, arrefecimento subterrâneo, refrigeração solar, etc ^[75]. O pré-arrefecimento do ar exterior antes de entrar no edifício pode assim, ser alcançado através de meios naturais. Tais abordagens de projeto são sugeridas especialmente quando a temperatura do ar externo excede o limite de conforto térmico. O desempenho da ventilação natural das chaminés solares também pode ser reforçado por sistemas solares ativos que compõem as duas células solares e coletores solares. Como um método simples, as chaminés solares podem ser concebidas para funcionar em conjunto com um ventilador movido por células a energia solar para aumentar a intensidade do fluxo quando necessário. Além disso, parece ser uma maneira viável para promover o uso de painéis fotovoltaicos ^[75]. Dos estudos realizados sobre o uso de chaminés solares para induzir a ventilação natural concluiu-se que ^[76]: (1) A posição da abertura de entrada afeta o desempenho do chaminé. A chaminé solar com entrada lateral tem o melhor desempenho térmico, (2) O rendimento térmico da chaminé solar diminui quando ambas as portas de entrada de ar estão abertas, (3) O desempenho da chaminé inclinada é melhor do que o da chaminé vertical, porque a radiação solar incidente sobre a chaminé inclinada é maior do que sobre a vertical, (4) O PCM modifica o desempenho térmico da chaminé e estende as horas de

ventilação após a ausência de energia solar ou no período noturno (descarregando a energia de armazenamento) ^[76].

Outros exemplos de ventilação são a refrigeração indireta, por radiação noturna e a refrigeração separada, que consiste em fazer circular o ar exterior ou por uma tubagem enterrada ou que atravessa um leito de água. O ar arrefecerá mais quanto maior for o percurso antes de chegar ao edifício. As tubagens de refrigeração podem constituir um sistema aberto que arrefece o ar do exterior, ou fechado, refrigerando o ar recolhido no próprio edifício ^[77].

A ventilação natural representa um dos sistemas passivos de arrefecimento mais eficientes, contribuindo para a eficiência térmica do edifício. A eficiência da ventilação natural, total ou parcial em edifícios depende muito das condições atmosféricas, nomeadamente da distribuição das pressões médias e da distribuição da dimensão, frequência, e correlação da variação de pressão na envolvente do edifício. A eficiência da ventilação é assim dependente da direção do vento, geometria do edifício, ambiente construído, temperatura interior e exterior e do nível da permeabilidade da envolvente ^[38].

Num edifício convencional deve ser garantida a circulação do ar no seu interior e deverá estar aberto às brisas e orientado de forma a captar qualquer brisa ou vento, sendo o chão frequentemente elevado e assente em estacas, de modo a aumentar a superfície exposta às brisas frescas, pois um terreno coberto com vegetação tende a reduzir o movimento de ar perto do solo. As portas e janelas devem ser tão grandes quanto possível, a fim de permitirem a entrada de ar. As aberturas para além de amplas e poderem ser abertas totalmente, devem estar localizadas segundo a direção das brisas mais frequentes, de modo a permitir uma corrente natural de ar através dos espaços interiores e ao nível do corpo humano. O movimento do ar pode ser influenciado pela topografia, orientação do edifício e posição das edificações vizinhas e como tal, todos estes aspetos devem ser analisados cuidadosamente. No caso de um espaço em que apenas se possam colocar aberturas num único lado, é preferível colocar uma abertura por cima da outra, provocando, desta forma, o efeito de chaminé ^[21]. Também a relação de dimensões da admissão de ar com a abertura de saída é importante, verificando-se que uma entrada de ar mais pequena e uma saída maior provoca um aumento da velocidade de circulação do ar, conduzindo o inverso a uma redução da velocidade de circulação do ar, abrangendo, no entanto, uma maior área interior ^[21].

Em regiões muito húmidas a refrigeração deverá ser acompanhada de desumidificação pois o suor não pode evaporar-se e o corpo humano encontra-se muitas vezes em desconforto devido ao excesso de calor. Os desumidificadores são materiais porosos que captam a humidade do ar, e o gel de sílica e a alumina são os materiais mais utilizados ^[77]. A refrigeração por desumidificação é muito adequada para climas equatoriais.

As vantagens subjacentes à utilização da ventilação natural, estão associadas aos custos de investimento, de funcionamento e de consumo reduzidos, através dos menores gastos energéticos, manutenção e substituições inexistentes, sem impacte ambiental tanto ao nível do ar como do ruído. Por outro lado a ventilação natural não é adequada para todos os climas nem para qualquer edifício, havendo necessidade de controlar a carga das fachadas e cargas internas, não havendo também garantias de taxas de fluxo de ar e/ou desempenho. Além disso requer uma utilização correta pelos ocupantes e não permite o controlo rigoroso da definição de temperaturas pré-determinadas ^[74].

3.1.6.1 Arrefecimento gratuito (*free-cooling*)

O arrefecimento gratuito ou *free cooling* consiste numa técnica que explora a existência de diferenças de temperatura entre ambientes (entalpia) para a produção de arrefecimento ^[47]. No arrefecimento gratuito, é utilizado um meio de armazenamento para armazenar o frio, quando a temperatura ambiente é inferior em comparação com a temperatura interior e o frio é extraído do meio de armazenamento sempre que é necessário usando uma ventoinha elétrica ^[46].

A principal diferença entre o arrefecimento gratuito e o arrefecimento noturno ventilativo é que no segundo a estrutura do edifício (como as paredes) atuam como o meio de armazenamento, enquanto na técnica de arrefecimento gratuito, uma unidade separada de armazenamento térmico é utilizada para o armazenamento de frio e um dispositivo mecânico como um ventilador é usado para armazenar e extrair o frio a partir da unidade de armazenamento. A vantagem do arrefecimento gratuito sobre o arrefecimento noturno ventilativo é que o frio acumulado pode ser extraído quando for necessário, fazendo circular o ar ambiente através da unidade de armazenamento. O *free cooling* pode ser feito utilizando os PCMs como meio de armazenamento. O carregamento de PCMs (processo de solidificação) é levado a cabo durante a noite e o frio acumulado é extraído durante os dias quentes. O processo de descarga ocorre durante o dia e

consiste no arrefecimento do ar através da descarga do frio armazenado nos PCMs e que ocorre durante o dia, ou seja, quando a temperatura ambiente sobe acima do limite de conforto.

O *free cooling* de edifícios com PCMs é uma das formas de ventilação passiva emergente, em especial nas condições climáticas em que a amplitude de temperatura diurna varia entre 12 e 15 ° C. A eficácia de técnicas de arrefecimento gratuito na redução da ventilação e nas cargas de arrefecimento dos edifícios durante a estação do Verão tem sido demonstrada em alguns estudos. É necessário aumentar a comercialização dos PCMs para conseguir preços competitivos destes sistemas comparativamente com os sistemas de arrefecimento convencionais e outras tecnologias de ventilação. Além disso, o *free cooling* com PCMs diminui o consumo de eletricidade comparativamente com a ventilação e ar condicionado convencionais, o que irá reduzir diretamente as emissões de CO₂ geradas no edifício.



Figura 13 – Dispositivo com esferas de PCMs para armazenamento de calor latente ^[78].

Foi realizado um estudo em in *Ljubljana, Slovenia* ^[78] sobre o *free cooling* aplicado a um edifício unifamiliar de baixa energia. Um modelo numérico adaptado a dispositivos cilíndricos de armazenamento energético de calor latente (LHTES) cheio de esferas contendo PCMs foi verificado com as medições em LHTES experimentais. Os resultados obtidos pelas simulações *TRNSYS* realizadas, envolvendo diferentes estratégias de ventilação, de taxas de fluxo de ar de ventilação e tamanhos de LHTES, evidenciaram as vantagens do arrefecimento gratuito nos edifícios de elevado e de baixo consumo energéticos. O arrefecimento gratuito ajuda a reduzir o tamanho do sistema de ventilação mecânica, proporciona temperaturas mais favoráveis e, portanto, condições de conforto térmico melhores, e neste caso, ar fresco para os ocupantes.

Wagas et al^[79] também desenvolveram estudos experimentais sobre *free cooling* de edifícios em condições climáticas quentes e secas, através da carga e descarga de PCM comercialmente disponível na gama de fusão de 28-29°C. Os resultados experimentais indicam que o armazenamento de PCMs pode ser usado para manter o ar quente dentro dos limites de temperatura definidos durante o dia, libertando o frio que foi armazenado nos PCM durante a noite. Concluiu-se que o parâmetro mais importante que afeta a solidificação de PCMs é a temperatura de entrada do ar de carga e que uma maior taxa de fluxo de ar será benéfica para a acumulação máxima de frio em PCMs durante o processo de carga tendo em vista as noites curtas do Verão. Concluiu-se que, se a temperatura do ar de carga não for inferior à temperatura de sub arrefecimento, (especialmente para PCMs de hidrato de sal), a solidificação do PCM não será iniciada e que uma taxa de fluxo de ar não será benéfica também, quando a temperatura do ar de carga não for mais baixa do que a temperatura de sub arrefecimento durante o processo de solidificação dos PCMs. Também se verificou que durante o processo de descarga, a altas temperaturas de entrada de ar, mais frio será extraído de PCM no período de tempo em comparação com menores temperaturas de descarga, devido à maior taxa de transferência de calor e ao aumento de perdas de calor.

O arrefecimento gratuito por ventilação é uma das técnicas mais eficientes de energia para refrigeração^[80]. Quando a ventilação é utilizada para o arrefecimento, devem ser utilizadas taxas de fluxo de ar variável a fim de atingir a temperatura ambiente confortável e para minimizar a procura de energia para ventilação mecânica. Assim, o *free cooling* exige a existência de um potencial para o arrefecimento e mecanismos de controlo para as necessidades do fluxo de ar.

Num estudo desenvolvido em *Freiburg*, Alemanha^[80] a temperatura de *free running* foi utilizada para avaliar o potencial de arrefecimento gratuito num edifício de escritórios. Considerando os ganhos de calor, temperatura exterior, temperaturas interiores, ventilação e taxas de fluxo de ar de 14 salas de escritório, foram calculadas as temperaturas de *free running* de cada sala para estimar o potencial da ventilação para o arrefecimento gratuito e para avaliar a economia de energia real para a refrigeração através da ventilação. Verificou-se que a ventilação garantiu o arrefecimento gratuito para o arrefecimento passivo e que quase todas as temperaturas medidas internamente estiveram dentro dos limites de conforto definidos na norma EN 15251, indicando claramente que o arrefecimento gratuito por ventilação fornece conforto térmico adequado. Este

estudo mostrou que o potencial de arrefecimento gratuito pode ser precisamente estimado usando a diferença entre os limites de conforto e da temperatura *free running* e que com base nela, a taxa de variação do ar de ventilação pode ser otimizado em relação ao arrefecimento passivo. O método pode ser utilizado para avaliar o potencial de arrefecimento livre num edifício com características térmicas específicas (isto é ganhos de calor) sob condições de temperatura diferentes no que diz respeito ao tempo e zonas de conforto. Assim, pode ser favoravelmente usado como uma ferramenta de *pré-design* para estimar os parâmetros de entrada para uma simulação de um modelo de construção e como um método de avaliação de desempenho para os edifícios atuais.

3.1.7 Recolha de água pluvial

O aproveitamento de água da chuva pode ser uma solução para combater a escassez de água que predomina em períodos de seca em muitos países pobres em desenvolvimento ^[81]. Este problema agrava-se quando as pessoas habitam em áreas rurais, isoladas de fontes e onde não existe qualquer sistema de abastecimento de água alternativo.

Os sistemas exigem alguma manutenção além de investimento inicial o que se torna desvantajoso num contexto economicamente desfavorável. No entanto, sistemas deste tipo têm sido implementados em países Africanos. Por exemplo em *Botswana* foram construídos em escolas primárias, centros de saúde e edifícios governamentais milhares de sistemas de captação de água pluvial através de telhados ^[82]. Também no Quênia existem projetos desde 1970 que com a contribuição dos construtores locais (fundis), trabalhando privadamente e usando o seu próprio projeto indígena, foram responsáveis pela construção de muitos tanques espalhados por todo o país ^[82]. Outros projetos têm emergido no Brasil, *Hawaii*, *Bangladesh*, China, Índia, Japão, Singapura, Tailândia, etc.

A Nigéria é o exemplo de um país em desenvolvimento que não pode satisfazer as suas necessidades de água domésticas e em 2007 apenas 47% do total da população tinha acesso à água a partir de fontes ^[77]. O país enfrenta a escassez de água em ambas as áreas urbanas e rurais, apesar da abundante terra e dos recursos hídricos que estão disponíveis em várias zonas ^[77]. O aumento da população e da urbanização aliadas às alterações climáticas podem aumentar ainda

mais a escassez de água. Se as chuvas abundantes no país particularmente no sudoeste da Nigéria forem bem aproveitadas poderão ajudar a resolver os problemas de escassez de água no país. Na Nigéria, os dados disponíveis sobre a recolha da água da chuva para uso doméstico são muito escassos e não estão bem documentadas, tornando difícil uma avaliação objetiva apesar da água da chuva constituir mais de 90% da água de superfície.

As tecnologias necessárias para a captação e armazenamento de água da chuva são simples de instalar e de fácil utilização e a população local pode facilmente ser treinada para implementar estas tecnologias ^[82]. O aproveitamento da água da chuva, é uma medida necessária e bastante útil, estando-se ao mesmo tempo a contribuir para a manutenção do meio ambiente e a ajudar as gerações futuras a usufruir da água com eficiência para a sobrevivência da humanidade.

Um sistema individual de recolha de água das chuvas para utilização doméstica é composto por:

- Captação ou superfície do telhado para recolher a chuva;
- Sistema de distribuição para transportar a água do telhado até ao reservatório de armazenamento (condutas de drenagem, caleiras);
- Sistema de tratamento;
- Reservatório de armazenamento que deve integrar um dispositivo de extração que pode ser uma torneira, bomba, etc), de acordo com a localização e que deve ser coberto para evitar perdas por evaporação;
- Sistema de distribuição para consumo.

Os reservatórios devem ser resistentes, estanques ter o fundo inclinado a pelo menos 1% para as caleiras ou para a caixa de descarga, e devem ser dotados de *bypass* para permitir as operações de manutenção, limpeza e desinfecção. Os reservatórios devem incluir dispositivos de ventilação que assegurem a renovação de ar permanente dentro da unidade. No caso específico de climas tropicais, onde a precipitação ocorre com intensidade e frequência em determinados períodos do ano, devem aplicar-se chapas anti salpicos para evitar o desperdício da água abundante que pode transbordar por cima da caleira ^[83]. Os reservatórios domésticos podem ser enterrados, semi enterrados, apoiados sobre o solo ou elevados, e variam em tamanho – desde um metro cúbico (1 000 litros) até centenas de metros cúbicos, no caso de reservatórios grandes. Duma forma geral, o tamanho varia de 10 até ao máximo de 30 metros cúbicos para um sistema doméstico, a nível do agregado familiar. Existem sistemas dotados de dispositivos destinados à desinfecção da água por ozonólise (adição de ozono), ou pastilhas de cloro ^[83]. No entanto o cloro apresenta algumas

desvantagens, nomeadamente a probabilidade de formar agentes cancerígenos (trihalometanos), quando reage com compostos orgânicos^[83]. A desinfecção por UV (raios ultravioleta) é um método económico, rápido e muito eficaz que impede a proliferação de bactérias e vírus causadores de doenças mortais como cólera, disenteria, e febre tifoide que têm sido causadoras de índices de mortalidade elevados em países subdesenvolvidos.

As primeiras chuvas transportam partículas e outros poluentes, logo estas águas deverão ser canalizadas para fora do depósito evitando a contaminação da água armazenada. Os dispositivos mais utilizados para a descarga das primeiras águas são recipientes de volume fixo e válvulas medidoras de volume.

A instalação de sistemas de recolha de águas pluviais obedece a especificações técnicas internacionais sobre dimensionamento e instalação de sistemas de aproveitamento de água da chuva a seguir enunciadas^[84]:

- As superfícies úteis de recolha não devem estar em contacto periódico com pessoas, animais ou máquinas;
- Devem adotar-se sistemas de filtragem que rejeitem as primeiras águas após longos períodos sem pluviosidade;
- Instalar válvula de corte no início do sistema para permitir a manutenção;
- Instalar válvula anti refluxo com membrana anti roedores na saída (*overflow*) do esgoto do depósito de armazenamento;
- Utilizar um depósito de preferência com material isento de porosidade e que não propicie reações químicas (por ex. polietileno de alta densidade);
- O depósito deve ser enterrado, para proteção da luz, e para manter temperaturas adequadas evitando a formação de algas e de microrganismos;
- Deve existir uma abertura para permitir o acesso ao interior;
- A entrada de água no interior do depósito deve ser feita do fundo para a superfície através de um acessório especial que não origine turbulência, além de que dessa forma se consegue uma oxigenação da água armazenada;
- A captação de água no interior do depósito pela bomba deve acontecer a cerca de dez, quinze centímetros abaixo do nível, sendo nessa zona que se encontra a melhor qualidade;

- O dimensionamento do sistema deve prever que o *overflow* do depósito aconteça entre três a cinco vezes por ano, garantindo-se uma boa renovação.
- No caso da água da chuva alimentar alguns equipamentos no interior dos edifícios, cisternas de WC, por exemplo, essa canalização deve ser independente da restante e sem possibilidade de cruzamento. As bombas que simultaneamente estão ligadas ao depósito da água da chuva e ao mesmo tempo à rede potável, fazendo a comutação automática após esgotar-se o depósito, devem possuir homologação garantindo a não entrada de água pluvial na rede potável por refluxo.
- Todas as torneiras alimentadas pela água da chuva devem ser assinaladas com etiquetas indicando “água não potável ou imprópria para beber”. Essas torneiras só poderão ser manipuladas com uma chave de segurança.
- A manutenção e limpeza do sistema devem fazer-se antes do início das chuvas e após o Inverno.
- Os principais parâmetros físico-químicos da água armazenada no depósito devem ser verificados com intervalos máximos de seis meses.
- De três em três anos poderá ser recomendável o esvaziamento total do depósito e a sua lavagem profunda.

Um estudo realizado em *Abeokuta* na Nigéria^[85] sobre a fiabilidade dos reservatórios de água da chuva no Sudoeste do país, num ano típico de seca, em casas com uma área de captação igual a 80m², permitiu concluir que um depósito com 7m³ assegurou o fornecimento de água em utilizações não potáveis nas instalações sanitárias (descargas de autoclismo), numa casa de família. Quando as utilizações não potáveis se estenderam aos trabalhos de lavandaria, então um tanque com 10m³ apresentou 100% de fiabilidade. Uma vez que se registaram perdas elevadas de água por transbordamento, concluiu-se também que um reservatório maior permitiria armazenar mais água e assegurar o seu fornecimento para outras utilizações possíveis.

Para o dimensionamento de um reservatório de água pluvial para utilização doméstica é necessário conhecer a área de captação que neste caso é a área da cobertura (aproximadamente 30 m²), e também a pluviosidade média anual que na capital do Senegal é 750 mm por ano. Considerando o valor de precipitação mais elevado, obtém-se o dimensionamento do depósito igual a 1,2 m³ pelo método de Azevedo Neto^[86] e 2,04 m³ litros pelo método prático inglês^[86].

3.1.8 Integração de soluções renováveis

A energia de origem renovável contribui para a redução do balanço energético de um edifício cujas necessidades energéticas podem ser bastante atenuadas através da implementação de medidas passivas e ainda da produção de energia elétrica ou outros tipos de energia a partir de fontes de energia renováveis. A componente construtiva ativa renovável é constituída por todos os elementos que funcionam em sistema de forma a produzir energia elétrica, térmica ou ambas como complemento das necessidades energéticas não satisfeitas pela componente passiva, englobando também a utilização de iluminação eficiente e sistemas de *free cooling*, permitindo a obtenção de balanços energéticos aproximadamente nulos.

3.1.8.1 Solar térmico

Os sistemas de solar térmico destinam-se ao aquecimento de água quente sanitária e encontram-se bastante difundidos com diversas ofertas de rendimentos de conversão ^[87]. Os sistemas funcionam de uma maneira muito simples: a radiação solar incidente no coletor solar penetra através dos vidros e é absorvida por uma placa metálica que se comporta como um corpo negro - a placa absorvedora, onde está incorporado um sistema de tubos que serve para transferir o calor gerado para o fluido de transferência térmica, existente no interior destes tubos, que por sua vez flui para o depósito de armazenamento de água. Este calor é transferido para a água do depósito através de um permutador de calor. A quantidade de energia recebida por um painel solar depende das condições climáticas que o utilizador não pode controlar. Para aproveitar a energia proveniente da radiação solar o coletor solar deve possuir uma superfície com elevada absorvidade para maximizar a captação de energia radiante incidente.

Um sistema solar padrão integra os seguintes elementos: coletor solar, depósito de armazenamento de água, circuito solar e apoio ao sistema solar (eletricidade, gás, etc), uma vez que na generalidade das situações os equipamentos solares não garantem a eliminação das necessidades de consumo energético, sendo por isso necessário o apoio de uma instalação convencional, que garanta as necessidades energéticas não asseguradas pelo sistema solar. Os coletores solares podem ser parabólicos concentradores compostos, coletores de tubos de vácuo e coletores solares planos, sendo estes últimos os mais utilizados pois são mais baratos, muito versáteis em relação à montagem (sobre telhado, integrado no telhado, montado na fachada e de

instalação livre), são simples de montar e eficientes. No entanto são menos eficientes que os restantes e exigem mais espaço nos telhados do que os coletores de vácuo. Estes apresentam as desvantagens do preço mais elevado e também de não poderem ser instalados em superfícies com inclinação inferior a 25° . O calor gerado pelos coletores é transportado para o (s) tanque (s) de armazenamento solar, através do circuito solar que é constituído por tubagens (normalmente em cobre e revestidas com isolante para minimizar as perdas de calor), fluido de transferência térmica (transporta o calor do coletor para o tanque de armazenamento e normalmente é água mais anticongelante, neste caso para aumentar a temperatura de ebulição), bomba solar (faz circular o fluido de transferência térmica no circuito solar e é escolhida em função do número de coletores), permutador de calor do circuito solar (transfere o calor para a água potável no tanque de armazenamento), equipamento e acessórios para enchimento, esvaziamento e drenagem e equipamento de segurança: vaso de expansão e válvula de segurança que protegem o sistema de danos (perdas) devido à expansão do fluido térmico. Os tanques de armazenamento ou acumuladores também são revestidos com isolante (por exemplo espuma rígida de poliuretano). Idealmente o acumulador deve estar dentro da habitação para minimizar as perdas térmicas e colocado verticalmente para otimizar a estratificação vertical da água quente que se pretende alcançar para evitar a mistura da água quente que sai com a água fria que entra. O controlador é o dispositivo que permite controlar e monitorizar todo o sistema e permite programar ou escolher programas pré-definidos de esquemas de instalação. Os parâmetros angulares (orientação e inclinação) dos coletores são fatores de extrema importância, visto que uma instalação incorreta poderá comprometer o bom funcionamento e o tempo de amortização de todo o sistema solar, e o sombreamento também é um fator determinante, porque pode comprometer o rendimento do sistema. Para diferentes ângulos de incidência do sol ao longo do ano, a uma determinada latitude, existe um valor máximo de radiação produzida que poderá ser obtido se a superfície recetora estiver inclinada a um determinado ângulo. O ângulo de inclinação ótimo, para os meses de Inverno (menor radiação) é maior que no Verão por causa da menor altura solar. Dado que as maiores necessidades de aquecimento são nos meses de Inverno, sabe-se, à partida que os painéis devem estar numa posição mais vertical que os 45° mas é necessário realizar vários cálculos que permitam concluir qual a inclinação que proporciona maior rendimento, otimizando a instalação. A análise do desempenho energético de um sistema solar térmico com recurso a simulações deve anteceder a sua utilização. O seu dimensionamento deve ser adequado às necessidades, sem custos exagerados de manutenção. Os simuladores efetuam a previsão do potencial de energia térmica, orçamentos e também níveis de emissões de CO_2 . As etapas que

antecedem as simulações referentes a um solar térmico são: identificação do local e descrição da envolvente do sistema, escolha da configuração do sistema solar, escolha do (s) coletor (es) solar (es) e suas características, escolha do tipo de depósito e permutador, escolha do apoio ao sistema solar e do consumo da habitação, e por fim executa-se a simulação. Estas soluções são geralmente aplicadas para a produção de águas quentes Sanitárias (AQS) para o uso em habitações, com necessidades de consumo regulares ao longo de todo o ano.

3.1.8.2 Solar fotovoltaico

A energia fotovoltaica é uma fonte de energia elétrica descentralizada, com elevado custo de investimento mas que apresenta grande durabilidade, facilidade de integrar, instalar, controlar e manter em edifícios ^[87].

A célula é o elemento mais pequeno do sistema fotovoltaico (FV) gerando tipicamente potências elétricas de corrente direta da ordem de 1,5W (correspondentes a uma tensão de 0,5V e uma corrente de 3 A). Para obter potências maiores, as células são ligadas em série e/ou em paralelo, formando módulos (tipicamente com potências de corrente direta da ordem de 100 a 200W); a agregação destes módulos dá origem aos chamados painéis fotovoltaicos. Para ligar os painéis à rede elétrica corrente alternada, é necessário um equipamento de interface, isto é, um conversor de corrente direta para corrente alternada (inversor) ^[87]. As células fotovoltaicas mais comuns são as de silício, que deram origem às tecnologias de primeira geração. A necessidade de encontrar materiais que permitam minimizar alguns problemas inerentes aos sistemas de conversão de energia solar em energia elétrica, essencialmente relacionados com o grau de pureza e eficiência, custos e durabilidade, levou ao desenvolvimento de novas tecnologias. Assim, surgiram as tecnologias de filme fino, designadas de segunda geração, assim como as de terceira geração que ainda se encontram numa fase de investigação embrionária ^[87]. As investigações reincidentem na procura de novos materiais que correspondam aos requisitos ideais de uma célula solar fotovoltaica e que são ^[88]:

- Banda de condução entre 1,1 e 1,7 eV;
- Estrutura de bandas direta;
- Materiais não tóxicos e facilmente obtidos na natureza;
- Técnica de deposição reprodutível e fácil para produção em grandes áreas;

- Boa eficiência de conversão fotovoltaica;
- Estabilidade por longos períodos de uso.

As tecnologias de 1.^a geração estão associadas ao silício cristalino, mas para além deste elemento, têm sido experimentados muitos outros, que se agrupam em tecnologias de alto rendimento, por sua vez agrupadas em tecnologias de 2.^a geração: filmes finos e tecnologias de terceira geração, ou emergentes. De seguida apresenta-se uma tabela com o resumo das tecnologias clássicas e emergentes^{[87] [88]}:

Tabela 4 – Tecnologias fotovoltaicas.

Tecnologias tradicionais		Novas tecnologias fotovoltaicas de alto rendimento	
Primeira geração		Segunda geração – filmes finos - absorvem melhor a radiação luminosa e a sua produção é menos dispendiosa	Terceira geração-tecnologias emergentes
Células de Silício monocristalino: eficiência elevada, cerca de 15%.Muito expandidas no mercado		Células de Telureto de Cádmio: alguns laboratórios já obtiveram eficiências acima de 16%. Apresentam problemas de índole ambiental, devido à toxicidade do Cádmio. O telúrio é um elemento raro na natureza.	Células orgânicas e poliméricas: apresentam eficiências máximas de 7-8% e são produzidas com materiais mais económicos
Células de Silício policristalino: processa mento menos dispendioso que o das monocristalinas. No entanto são menos eficientes		Células de Silício amorfo: têm uma eficiência comparativamente baixa (11-12%) no máximo e estes valores vão baixando até 5-6% devido à degradação que sofrem derivado da exposição solar.	Células de Gratzel ou sensibilizadas por corante: Uma célula solar Gratzel funciona como uma pilha convencional, em que o ânodo é o dióxido de titânio e o cátodo é a platina. Os materiais, são bastante flexíveis, permitindo que os painéis solares possam ser integrados nas mais diversas aplicações. No entanto, a expansão desta tecnologia tem sido condicionada por problemas associados à corrosividade do eletrólito, diminuindo o tempo de vida útil das células, e também à escassez da platina que, por ser rara, é bastante cara.
Fitas de silício: representam apenas 3% no mercado.		Células de Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio: são as células de filme fino mais eficientes com rendimento entre 11 e 13% (20% em laboratório). Têm elevada resistência à exposição à luz e os materiais não são tóxicos. É uma tecnologia dispendiosa, pois as células são formadas por cinco elementos.	Nanoantenas: Resumidamente consiste na «sintonização» de uma antena para a frequência da radiação de infravermelho, e que capta energia solar durante o dia e a radiação da terra durante a noite. Absorvem vários comprimentos de onda da luz, conforme a sua dimensão, possibilitando, assim, aumentar o espectro de radiação absorvida e melhorara a eficiência da célula que pode atingir 80%.
Outras: Células de Arseneto de Gálio (GaAs) e Fosforeto de Índio. São ambas muito eficientes mas os materias são muito escassos e por isso caros. Por essa razão são mais utilizados em aplicações espaciais.			

Atualmente as células de filme fino são mais baratas que as células de silício cristalino, mas a sua eficiência é ligeiramente inferior. No entanto, as diferentes tecnologias de filme fino têm evoluído a um ritmo que, rapidamente permitirão atingir a paridade pretendida, ou até mesmo a superação. Um detalhe muito importante está relacionado com os substratos aplicáveis às tecnologias de segunda geração. A aplicação de filmes finos em edifícios, (fachadas, (integradas em vidros) e coberturas (nas telhas), tem contribuído para a evolução da arquitetura sustentável, que cada vez mais opta pela utilização de materiais de construção inovadores, não só pelas suas características de compatibilidade ambiental, como também pelas suas especificidades nas vertentes da conversão e da racionalização energética.

Os módulos fotovoltaicos são constituídos por várias células ligadas em série e/ou em paralelo de forma a obter os valores desejáveis de tensão e corrente. A norma europeia Standard EN 50380 especifica quais as características técnicas que os fabricantes devem apresentar nas folhas descritivas das características dos módulos fotovoltaicos. Nem todos os fabricantes respeitam esta norma, não fornecendo todas as características técnicas que a norma impõe. Estes valores são essenciais para se poderem realizar estimativas da quantidade de energia a ser gerada, bem como verificar a compatibilidade de ligação com outros componentes do sistema fotovoltaico. Todos estes valores são obtidos em condições de teste Standard (STC). O coeficiente de temperatura é muito importante, porque em dias em que a radiação é elevada, a temperatura nas células aumenta, podendo chegar aos 70°C, causando uma redução do rendimento. Por outro lado a baixas temperaturas, o valor de tensão em circuito aberto aumenta. As características construtivas dos módulos também devem ser evidenciadas, nomeadamente (dimensões, espessura e peso), porque permitem escolher as estruturas de suporte e o espaço que os módulos vão ocupar. Existe uma enorme variedade de opções no mercado, pelo que quando se faz a escolha de um módulo fotovoltaico é necessário ter em conta alguns fatores, como por exemplo a qualidade o tipo de célula solar, a eficiência, energia produzida, ângulo de inclinação e orientação. A radiação é medida numa superfície horizontal ao longo de um determinado período de tempo sendo este valor dado em kWh/m². Pode ser uma média anual, mensal ou um valor diário. A quantidade de energia produzida por um sistema fotovoltaico é influenciada pela orientação do painel e pelo ângulo de inclinação deste relativamente ao plano horizontal. Se estes parâmetros proporcionarem um aumento da energia captada pelos módulos, a energia produzida também vai aumentar.

Num sistema FT isolado, para não se correr o risco de o sistema ser ou sobre ou subdimensionado, é necessário calcular as cargas previsíveis, para se estabelecer o consumo diário. Se os consumos forem semelhantes no Inverno e no Verão, o sistema deverá ser dimensionado para o Inverno, pois nesta altura do ano a quantidade de energia solar é menor que no Verão. Se não forem semelhantes deverá ser efetuado o cálculo para ambas e verificar o caso mais desfavorável.

A fase mais importante e complexa do processo de dimensionamento de um sistema fotovoltaico autónomo consiste na caracterização dos consumos diários de energia elétrica. Num sistema fotovoltaico autónomo, dado que a produção e consumo de energia muitas vezes não coincidem, é necessário recorrer ao armazenamento de energia. Para tal deverão ser utilizadas baterias, que devem ter tempos de vida útil longos em condições de carga e descarga diárias e apresentar uma elevada eficiência de carga, mesmo para baixas correntes de carga e uma baixa razão de auto descarga. O dimensionamento do banco de baterias é o aspeto mais importante do dimensionamento de um sistema isolado, pois é dele que dependerá a funcionalidade do sistema.

O *RETScreen* é uma das ferramenta de dimensionamento e simulação de sistemas solares fotovoltaicos disponível e que foi desenvolvido no Canadá. É um *software* utilizado para o estudo, dimensionamento e análise de dados de sistemas fotovoltaicos permitindo simular sistemas com ligação à rede, autónomos e inclui bases de dados meteorológicos de diferentes locais e de diversos componentes de sistemas fotovoltaicos (módulos fotovoltaicos, inversores, reguladores de carga, etc) bem como ferramentas gerais de apoio ao aproveitamento da energia solar.

A energia fotovoltaica tem características aliciantes, pois é segura, limpa, robusta e fácil de introduzir e implementar em todo o mundo, tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento.



Figura 14 - Programa micro-solar em expansão nos países Africanos ^{[89] [90]}.

A *Solar Aid* na Tanzânia tem dois programas principais de fotovoltaicos, 'micro' e 'macro', e está a desenvolver o mesmo produto no Quênia, *Malawi*, Zâmbia. O programa de micro-solar consiste numa construção de madeira que enquadra 1-2 módulos fotovoltaicos, baterias recarregáveis e luminárias. Este produto é designado *Sunny Money*, porque é usado para substituir lanternas a querosene, e produz energia elétrica livre por muitos anos. A *Solar Aid* descobriu que os Africanos rurais preferem este sistema para as lanternas, do que a iluminação suspensa que eles associam às cidades.

No interior da Austrália, o uso de painéis fotovoltaicos para fazer funcionar as bombas de água é muito comum e uma instalação de armazenamento de água pode assegurar o seu fornecimento ^[91]. O investimento inicial de um sistema é elevado mas os benefícios são evidentes e duradouros pois a instalação de sistemas solares fotovoltaicos pode garantir o abastecimento de água durante períodos mais secos. Na falta de meios para a instalação de um sistema solar fotovoltaico numa habitação, pode-se optar alternativamente pela instalação de um sistema coletivo que assegure o abastecimento de água durante a estação seca, extraída de poços ou de depósitos coletivos destinados ao armazenamento de água pluvial. Esta pode ser também a solução para melhorar a agricultura e criação de animais ^[91]. A energia fotovoltaica é adequada para todo o continente Africano, que tem níveis de radiação solar elevados ^[92].

Aproveitando a radiação solar e a temperatura exterior através da aplicação de técnicas passivas eficazes, é possível diminuir ou anular o recurso a sistemas de climatização ativos. Um estudo

realizado em regiões tropicais no Nordeste do Brasil ^[93], demonstra que a utilização unitária ou de sistemas passivos ou ativos não dá as respostas adequadas para o *design* de uma habitação destinada a regiões tropicais com uma estação húmida e outra seca. Os resultados demonstraram que para estas regiões, o uso de uma estratégia mista em execução tem desempenho otimizado de energia e forneceu melhores níveis de conforto térmico de uma forma muito mais eficaz.

3.2 Resumo e conclusões do capítulo

No capítulo três são abordados todos os parâmetros relevantes que influenciam ou que devem influenciar as soluções construtivas, dando grande expressividade às estratégias passivas num clima tropical, e quase sempre se conseguem ilustrar e justificar as soluções apresentadas com estudos desenvolvidos recentemente e que introduzem estratégias e sistemas mais antigos conjugados com tecnologias mais recentes e emergentes.

O fator forma de um edifício é um dos parâmetros a ter em conta, no entanto, de acordo com diversos estudos, este pode ser mais determinante em construções localizadas em regiões mais frias onde predominam as necessidades de aquecimento, se bem que, mesmo assim, de um modo geral se defende que o fator de forma deve ser reduzido e a compactidade elevada.

A trajetória do Sol ao longo do ano e a radiação solar incidente ou direta, também são fatores determinantes na orientação dos edifícios, assim como nas soluções construtivas da envolvente, pois o principal objetivo é precisamente restringir os raios solares.

As envolventes do edifício: opaca (pavimento, paredes, cobertura) e a envidraçada, têm que ser minuciosamente estudadas durante a fase de projeto para que se consiga uma combinação ideal de materiais de elevado desempenho, de preferência ecológicos e de custo reduzido. A densidade, resistência térmica, calor específico, propriedades radiativas e ainda espessura e cor são propriedades muito importantes a ter em conta nos materiais a utilizar, no entanto, não é fácil aliar as melhores soluções construtivas aos materiais mais económicos, pois as soluções que à partida são mais eficientes estão associadas a tecnologias de ponta, de que são exemplo os PCMs ou as janelas com vidro duplo reflexivo de baixa emissividade, com caixilharia estanque e perfil de alto desempenho.

Neste capítulo também são referenciados sistemas solares passivos de ganho indireto, concretamente as paredes de *Trombe*, que são paredes de armazenamento térmico com elevada inércia térmica, e que são mais indicadas para construções onde as necessidades de aquecimento prevalecem, pois este sistema solar passivo é indutor de ganhos de calor indesejados e fenómenos de sobreaquecimento, durante os períodos quentes.

A performance das coberturas é considerada um dos grandes contributos para o desempenho energético de um edifício, principalmente quando este está localizado perto do Equador onde a radiação solar é mais intensa. Por esta razão as coberturas devem estar protegidas do sol com isolantes térmicos refletivos ou barreiras radiantes. Uma alternativa mais ecológica mas viável, como comprovam alguns estudos referenciados, são as coberturas ajardinadas, que além de restringirem os ganhos solares, retêm parte das águas pluviais incidentes e também atuam como filtro destas águas que podem ser reaproveitadas.

As técnicas de ventilação são utilizadas para melhorar a qualidade do ar interior e as condições de conforto dos edifícios. Das pesquisas realizadas no âmbito desta dissertação conclui-se que as técnicas de arrefecimento passivo estão quase sempre associadas a sistemas de ventilação que permitem a entrada de ar fresco nas casas e o arrefecimento fisiológico dos ocupantes. A conjugação de tecnologias de arrefecimento passivo com meios ativos alimentados por fontes renováveis como o sistema solar fotovoltaico pode ser uma solução para obter o conforto térmico desejado e o *free cooling* ou arrefecimento livre com PCMs consiste numa das formas de ventilação passiva emergente, com resultados satisfatórios permitindo reduzir o tamanho do sistema de ventilação mecânica numa casa.

No capítulo é ainda introduzido o tema da recolha e armazenamento de água pluvial o que se justifica por dois motivos: a falta de água no Senegal, durante a estação seca, justifica o seu armazenamento durante a estação das chuvas e porque um sistema de recolha de água pluvial está quase sempre associado à utilização de bombas que podem ser alimentadas por um sistema fotovoltaico. Por este motivo e também devido às ótimas condições solares, as soluções renováveis de solar térmico e fotovoltaico não são negligenciadas nesta parte do trabalho, apesar do seu dimensionamento não estar incluído neste estudo.

Ao longo do capítulo são evidenciadas algumas divergências entre as soluções construtivas relativas por exemplo às janelas e pavimentos, (as quais demonstram as dificuldades em projetar casas para climas quentes e húmidos com elevada pluviosidade concentrada num período pequeno), assim como a versatilidade de soluções desde as mais ancestrais até às mais recentes e que permitirão obter o conforto térmico.

4. Otimização do comportamento térmico das casas modulares pré-fabricadas em climas tropicais

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os estudos feitos no *Energyplus* a fim de avaliar quais as soluções construtivas mais adequadas ao clima tropical. É dada especial relevância às propriedades dos materiais tais como a densidade, resistência térmica, calor específico, e ainda espessura inerentes aos elementos que compõem as envolturas opaca e envidraçada.

As casas pré-fabricadas são quase sempre associadas a soluções construtivas muito simples e leves e por essa razão o ponto de partida será um modelo referencia com elementos de inércia baixa, com exceção do pavimento que tem inércia forte, pré definidos no *DesignBuilder* como *Reference lightweight*, sendo que a construção na globalidade apresenta inércia média baixa.

4.2 Metodologia

A simulação dinâmica é fundamental para projetar edifícios energeticamente eficientes e deve ser realizada com programas devidamente acreditados segundo a Norma ASHRAE 140-2004, dos quais se destaca o *EnergyPlus*, desenvolvido pelo *DOE (USA Department of Energy)*, utilizado neste trabalho, através da interface *DesignBuilder*.

Habitualmente os espaços de um edifício com características semelhantes são agregados numa única zona, pois prevê-se que tenham um comportamento térmico idêntico. Em relação ao pequeno edifício em estudo, os quatro espaços correspondem a quatro zonas distintas, permitindo uma análise detalhada de cada espaço.

4.3 Climas tropicais

O clima alvo deste estudo é o tropical com chuvas de Verão, designado por Aw, segundo a classificação climática de *Köppen-Geiger*, e que é típico de Dakar, capital do Senegal. O clima é geralmente quente e húmido durante todo o ano. Há duas estações: a chuvosa, de Junho a Outubro e a estação seca, entre Novembro e Maio. A humidade é maior durante a estação chuvosa. A precipitação varia entre 300 milímetros no extremo Norte e 1.500 mm no extremo Sul. As temperaturas médias durante a estação seca variam entre 22 ° C e 30 ° C. Em Dakar a temperatura média é 24 ° C de Janeiro a Março, entre 25 ° C a 27 ° C, em Abril, Maio e Dezembro, e 30 ° C entre Junho e Outubro ^[22].

A velocidade do vento é relativamente baixa variando entre cerca de 7m/s em Março e Abril e 3,6m/s em Agosto e Setembro, e os ventos Norte são os predominantes, seguidos dos de Noroeste e Nordeste ^{[91] [92]}. A humidade média relativa varia entre 67% em Fevereiro e 80% no mês de Agosto, pois trata-se de um clima húmido com chuvas de Verão ^[92].

4.4 Perfis de utilização e cargas térmicas interiores

Os perfis são usados para definir os períodos de utilização e funcionamento de todos os elementos de um edifício. Para simular com rigor a casa modular especifica-se para cada zona, os padrões de utilização, de iluminação, de utilização de equipamentos, de ventilação e de funcionamento do sistema de climatização. Adicionalmente especifica-se também para cada zona os valores máximos e mínimos da temperatura e humidade relativa do ar interior (*setpoints* da temperatura e humidade relativa do ar) a garantir pelos sistemas de climatização.

Os *setpoints* para as temperaturas de aquecimento e de arrefecimento são calculados pelo método gráfico para ambientes típicos interiores, definido na Norma ANSI/ASHRAE Standard 55 2004 *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Este método pode ser aplicado a ambientes interiores em que os ocupantes exerçam atividades sedentárias correspondentes a taxas metabólicas que variam entre 1 e 1,3 met, e em que a resistência térmica da roupa varia entre 0,5 no Verão e 1 no Inverno, e a velocidade do ar interior é inferior a 0,2 m/s. Os valores são determinados utilizando a *Thermal Comfort Tool for Ashrae-55* ^[93]. Para que existam condições de conforto o índice PMV de *Fanger* deverá estar no intervalo entre -0,5 e 0,5.

Tabela 5 – Perfis de atividade e de iluminação nos quartos.

Quartos: Zonas 1 e 3	
Ocupação (pessoa/m ²)	0,17 (perfil de ocupação de quarto-de dormir)
Atividade metabólica	1 met
Índice de clo de Inverno (clo)	0,72
Índice de clo de Verão (clo)	0,5
Temperatura de "Setpoint" de aquecimento (°C)	23,5
"Heating set back" (°C)	10
Temperatura de "Setpoint" de arrefecimento (°C)	27
"Cooling set back" (°C)	30
"Setpoint" de humedificação	40
"Setpoint" de desumidificação	70
Temperatura de "Setpoint" de ventilação natural (°C)	27
Ar fresco mínimo (l/s-pessoa)	8
Iluminância (lux)	100
Densidade de iluminação padrão (W/m ² -100 lux)	8 (perfil de iluminação de quartos-de-dormir)
Tipo de luminária	Suspensa
Fração radiante	0,42
Fração visível	0,18
Ganhos internos (W/m ²)	5 (equipamentos elétricos não especificados)
Fração radiante	0,2

Tabela 6 - Perfis de atividade e de iluminação na sala com cozinha comum.

Sala e Cozinha: Zona 4	
Ocupação (pessoa/m ²)	0,16 (perfil de ocupação de cozinha)
Atividade metabólica	1,1 met (trabalho muito leve)
Índice de clo de Inverno (clo)	1
Índice de clo de Verão (clo)	0,5
Temperatura de "Setpoint" de aquecimento (°C)	21
"Heating set back" (°C)	10
Temperatura de "Setpoint" de arrefecimento (°C)	26
"Cooling set back" (°C)	30
"Setpoint" de humedificação	40
"Setpoint" de desumidificação	65
Temperatura de "Setpoint" de ventilação natural (°C)	26
Ar fresco mínimo (l/s-pessoa)	8
Iluminância (lux)	200
Densidade de iluminação padrão (W/m ²)	8 (perfil de iluminação de cozinha)
Tipo de luminária	Suspensa
Fração radiante	0,42
Fração visível	0,18
Ganhos internos (W/m ²)	30,28 (equipamentos elétricos instalados na cozinha)
Fração radiante	0,2
Ganhos internos (W/m ²)	8 (frigorífico sempre ligado)
Fração radiante	0,2
Ganhos internos (W/m ²)	80 (fogão)
Fração radiante	0,2

Tabela 7 - Perfis de atividade e de iluminação na casa de banho.

WC: Zona 2	
Ocupação (pessoa/m ²)	0,16 (perfil de ocupação de WC)
Atividade metabólica	1,1 met
Índice de clo de Inverno (clo)	1
Índice de clo de Verão (clo)	0,5
Temperatura de "Setpoint" de aquecimento (°C)	21
"Heating set back" (°C)	10
Temperatura de "Setpoint" de arrefecimento (°C)	26
"Cooling set back" (°C)	30
"Setpoint" de humedificação	40
"Setpoint" de desumidificação	70
Temperatura de "Setpoint" de ventilação natural (°C)	26
Ar fresco mínimo (l/s-pessoa)	8
Iluminância (lux)	50
Densidade de iluminação padrão (W/m ²)	8 (perfil de iluminação de WC)
Tipo de luminária	Suspensa
Fração radiante	0,42
Fração visível	0,18
Ganhos internos	5 (equipamentos elétricos utilizados na W.C)
Fração radiante	0,2

4.5 Definição do caso de referência em climas tropicais

Começa-se por modelar a arquitetura da casa modular, em três dimensões, no *DesignBuilder*, integrando todos os pormenores construtivos importantes para caracterizar o comportamento térmico e os consumos energéticos. Trata-se de uma casa modular retangular com uma área útil de 54,4 m² distribuída por dois quartos, uma casa de banho e uma sala com cozinha comum.



Figura 15 – Divisão dos espaços da casa modular projeto.

Partindo de uma casa referência com materiais que conferem inércia média baixa, foram feitas alterações aplicando técnicas passivas, como orientação solar adequada, materiais de elevada inércia térmica, o sombreamento dos envidraçados, ventilação natural, etc, de forma a diminuir as temperaturas interiores da casa, resultando no aumento de conforto.

No que se refere à orientação solar opta-se por orientar a cozinha e WC para Norte e os quartos e a sala para Sul, onde predominam os envidraçados. As paredes Este e Oeste não têm envidraçados, para evitar os ganhos solares excessivos durante a estação de arrefecimento, ou seja, durante o Verão.

Os envidraçados estão protegidos com estores exteriores para aumentar a eficácia do sombreamento, estando os envidraçados maiores orientados a Sul, também protegidos com o avançado que se prolonga ao longo da fachada. Os estores estão programados no *software* para abrir totalmente entre as 20:00 e 24:00 e 25% até às 08:00 H, ficando fechados durante o resto do dia, no período da estação quente. No Inverno os estores estão apenas abertos entre as 08:00 e as 18:00H para aproveitar os ganhos solares pelos envidraçados. Também existem janelas opostas, para promover a ventilação natural, bastante recomendada para os climas quentes. As janelas estão sempre todas abertas mas não na totalidade considerando-se apenas 25%. Neste modelo são assim criadas condições que favorecem a ventilação natural, através da fenestração que inclui os envidraçados inseridos nas paredes Sul e Norte e as portas, sendo também instalados ventiladores naturais (aberturas de ventilação) nas paredes exteriores e interiores.

4.5.1 Solução construtiva

Para a casa referência escolheram-se elementos construtivos pré-definidos no *DesignBuilder* como “*Reference Lightweight*”, de acordo com as figuras seguintes.



Figura 16 - Caracterização dos elementos construtivos da cobertura da casa referência.



Figura 17 – Caracterização dos elementos construtivos do pavimento da casa referência.

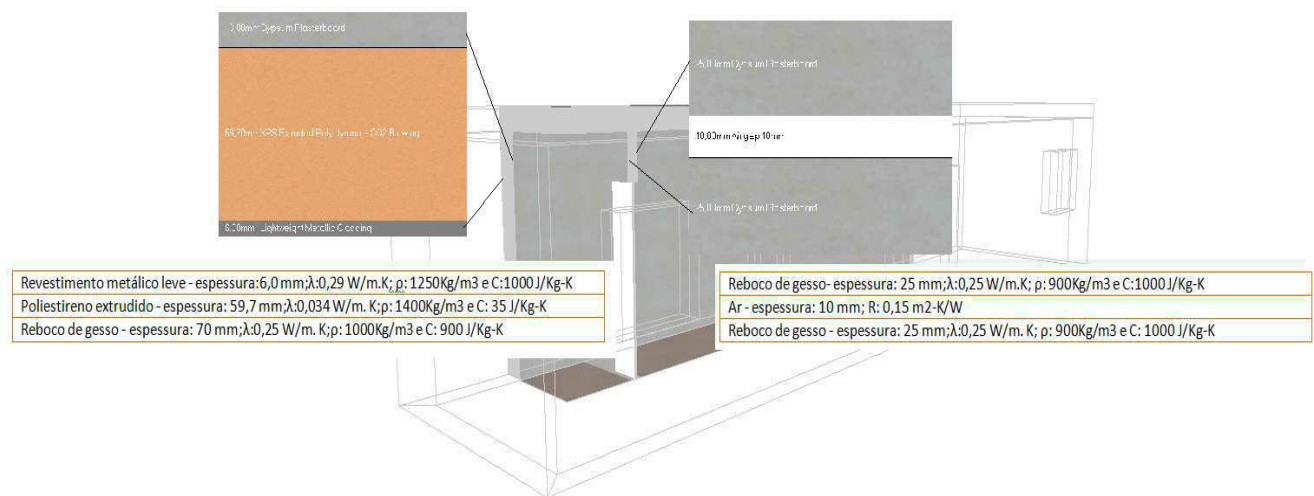


Figura 18 - Caracterização dos elementos construtivos das paredes exteriores e interiores da casa referência.

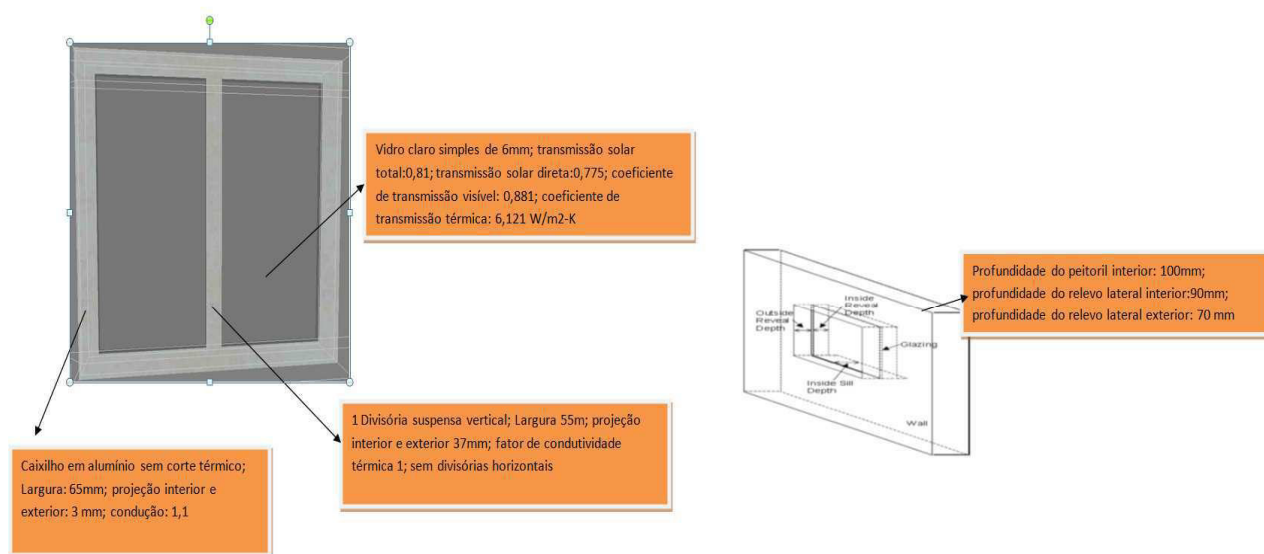


Figura 19 - Caracterização dos envidraçados da casa referência.

4.5.2 Caracterização do comportamento térmico e de habitabilidade

Os indicadores escolhidos para avaliar as condições de conforto térmico dentro da casa referência são a temperatura operativa, a humidade relativa e o índice PMV de *Fanger*, sendo este modelo o mais aceite atualmente, como foi justificado no capítulo três.

Tabela 8 - Médias mensais de temperatura ambiente no exterior e da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de *Fanger* no interior da casa referência sem climatização.

Data	Quarto Oeste				Quarto Leste				Sala/ Cozinha				WC			
	T. A. °C	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV
01-01-2002	20,2	23,7	55,2	-0,6	23,2	55,9	-0,8	27,4	43,3	1,1	24,4	52,9	0,4			
01-02-2002	20,3	22,9	63,8	-0,9	22,7	64,3	-0,9	26,0	52,0	0,8	23,4	62,5	0,2			
01-03-2002	20,8	24,3	67,4	-0,3	23,9	68,2	-0,4	28,0	52,9	1,4	25,0	64,8	0,6			
01-04-2002	21,2	24,8	70,6	-0,6	24,4	71,8	-0,8	28,5	55,4	1,0	25,6	67,8	0,0			
01-05-2002	23,0	28,9	70,4	1,1	28,0	72,1	0,8	33,2	51,6	2,8	30,2	63,7	1,7			
01-06-2002	25,1	31,6	71,6	2,3	30,7	73,6	1,9	36,2	51,0	4,0	33,2	63,5	2,9			
01-07-2002	27,0	33,2	71,0	3,0	32,3	73,4	2,6	37,9	50,3	4,6	34,8	63,0	3,5			
01-08-2002	27,3	33,1	76,5	3,0	32,2	78,7	2,7	37,7	55,0	4,6	34,7	68,3	3,6			
01-09-2002	27,7	33,6	74,6	3,2	32,6	76,6	2,8	38,3	53,0	4,8	35,1	66,3	3,7			
01-10-2002	27,5	32,6	72,6	2,9	31,8	74,7	2,5	37,1	52,4	4,0	34,1	65,1	3,3			
01-11-2002	25,9	31,5	69,8	2,4	30,6	71,4	2,0	36,1	49,5	3,7	33,0	61,9	2,9			
01-12-2002	23,1	27,5	61,8	0,8	26,6	62,8	0,5	31,4	46,7	2,3	28,4	57,3	1,5			

A tabela 8 apresenta as temperaturas operativas médias mensais obtidas e que são demasiado elevadas em todas as divisões da casa durante praticamente todo o ano, atingindo valores insuportáveis durante o Verão. Os valores médios mensais de PMV variam entre -0,6 no Inverno e 4,8 sendo a média anual próxima de 2,1. Os valores acima de 2 são indicadores de calor e acima de 3 são indicadores de muito calor, logo as médias mensais obtidas denunciam a habitabilidade muito fraca da casa modelada, inabitável em determinadas alturas do ano, se não for introduzido um sistema de climatização eficaz para se obterem condições de conforto.



Figura 20 – Gráficos das médias anuais de temperatura, humidade relativa e índices de conforto do interior da casa referência sem climatização.

Os gráficos apresentados na figura 20 ilustra resumidamente o desempenho térmico muito fraco da casa referência. Verifica-se que a temperatura operativa média anual é 32°C, muito superior à temperatura do ambiente exterior.

4.5.3 Soluções de climatização avaliadas

A climatização é o processo de tratamento do ar em que se controla simultaneamente a temperatura, a humidade, a limpeza e a distribuição do ar para responder às exigências do espaço climatizado.

Um sistema individual consiste num aparelho ou conjunto de aparelhos diferentes que servem de forma individual cada espaço do edifício. Nestes sistemas os equipamentos de produção de calor ou de frio são compactos, fabricados em série, utilizam o sistema de expansão direta de um fluido refrigerante, servem apenas um espaço e localizam-se perto dos ambientes que condicionam ^[94]. São designados sistemas de expansão direta dum fluido refrigerante em que os elementos

principais que compõem o ciclo frigorífico são o evaporador, o compressor, o condensador e o dispositivo de expansão.

Exemplos destes sistemas autónomos são as unidades de ar condicionado do tipo *split* compostas por uma unidade no exterior e outra no interior do espaço condicionado e as unidades de janela, sendo este último o sistema de climatização de expansão direta mais elementar e mais comum. Estes aparelhos são dotados de compressor, condensador arrefecido com ar, dispositivo de expansão, serpentina de arrefecimento e desumidificação do tipo expansão direta, filtros e ventiladores para circulação do ar condicionado e para arrefecimento do condensador. Normalmente o aquecimento é feito por meio de uma bateria de resistências elétricas, muito embora possam existir aparelhos de janela que podem operar como bomba de calor, através da inversão do ciclo frigorífico.

A aplicação de sistemas de climatização por expansão direta tem algumas vantagens^[95]:

- Baixa potência instalada;
- Fácil manutenção;
- Elevada fiabilidade e facilidade na montagem;
- Ocupam pouco espaço;
- Tempo de montagem reduzido;
- Arranque reduzido na instalação;

Por outro lado apresentam as seguintes desvantagens^[95]:

- Não apresentam versatilidade em alterações;
- Apresentam baixa robustez técnica e funcional;
- Reduzida potência instalada e limites de potência limitados;
- Interferem em fachadas pois o condensador é exposto.

Tendo em consideração as vantagens subjacentes aos sistemas de expansão direta, é avaliado, na casa referência, um sistema deste tipo e que foi dimensionado no *Designbuilder*, com as características apresentadas na tabela 9.

Tabela 9- Caracterização técnica dos equipamentos de expansão direta.

Ventilação mecânica (Ventiladores)		Recuperação de calor sensível	
Modo de operação	Contínua	Eficácia	70%*
Eficiência total	70%*		
Ventilador de ar	100%		
Sistema economizador	Não aplicado	Setpoint de temperatura de aquecimento ($^{\circ}\text{C}$)	15**
Aquecimento		Arrefecimento	
Convectivo		Convectivo	
Temperatura de ar fornecido ($^{\circ}\text{C}$)	35	Temperatura de ar fornecido ($^{\circ}\text{C}$)	12
CoP	4	CoP	4
Humidade no ar fornecido (g/g)	0,016*	Humidade no ar fornecido (g/g)	0,008*
Humidificação		Desumidificação	
umidostato		umidostato	
Potencia (kW)	2,69 *		
Capacidade (m^3/s)	0,000001*		
Tipo de controlo	Serpentina de aquecimento/reaquecimento		

*Valor padrão definido no *DesignBuilder*.

**Valor sugerido no *DesignBuilder*. Valores superiores aumentam as cargas de arrefecimento no Verão

*** A serpentina de aquecimento arrefecimento-reaquecimento arrefece além do valor nominal de bolbo seco, conforme necessário para atender o valor nominal de humidade, se o sistema for capaz de o fazer. O reaquecimento é fornecido como exigido pela serpentina de aquecimento. Na simulação, são modeladas duas instâncias da bobina de aquecimento, uma para o aquecimento, e uma para o reaquecimento. Os dois objetos representam a mesma serpentina física e nunca operam simultaneamente.

Os coeficientes de performance, COP, foram selecionados de acordo com as especificações técnicas de equipamentos semelhantes que se encontram atualmente no mercado.

Alternativamente à climatização ativa por expansão direta considera-se a possibilidade de climatizar a casa apenas através de ventilação natural. No *DesignBuilder* a ventilação natural pode ser programada e definida para cada zona considerando uma calendarização e valores máximos constantes de renovação de ar e de infiltrações, ou a ventilação natural e as infiltrações podem ser calculadas com base na fenestração (janelas, portas) e também ventiladores, considerando também os ganhos internos, as variações de temperatura, do vento etc. Este cálculo detalhado pode ser aplicado quando não existe controlo automático da ventilação natural que é o que acontece neste caso. Apesar deste modelo de cálculo detalhado ser mais complexo e por isso tornar as simulações mais demoradas, é o processo escolhido, uma vez que a casa em estudo tem dimensões reduzidas e este método permite obter resultados mais reais sobre o efeito da ventilação natural numa habitação que idealmente deverá ser passiva.

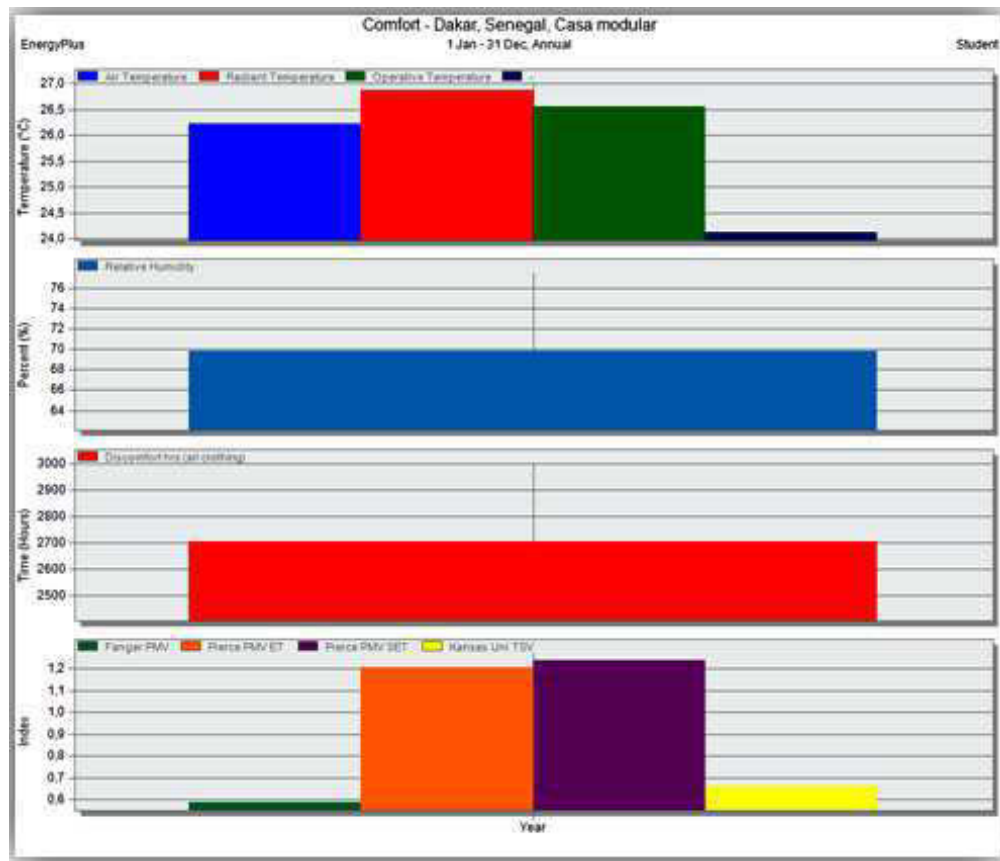


Figura 21 – Gráficos das médias anuais de temperatura, humidade relativa e índices de conforto do interior da casa referência com ventilação natural.

Tabela 10 – Médias mensais de temperatura ambiente no exterior e da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de *Fanger* no interior da casa referência com ventilação natural.

Data	Quarto Oeste				Quarto Leste				Sala/ Cozinha				WC			
	T. A. °C	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV		T.Op. °C	HR	PMV		T.Op. °C	HR	PMV	
01-01-2002	20,2	22,7	57,3	-1,0	22,5	57,9	-1,0		24,6	50,5	0,4		23,3	55,1	0,1	
01-02-2002	20,3	22,4	65,5	-1,0	22,2	65,9	-1,1		24,2	57,9	0,4		23,0	63,2	0,1	
01-03-2002	20,8	23,4	69,9	-0,6	23,2	70,3	-0,7		25,1	62,1	0,6		24,0	67,2	0,4	
01-04-2002	21,2	23,9	73,3	-1,0	23,8	73,8	-1,0		25,5	66,1	0,0		24,4	70,8	-0,4	
01-05-2002	23,0	25,7	75,3	-0,2	25,6	75,5	-0,2		26,7	70,6	0,4		25,9	74,3	0,2	
01-06-2002	25,1	27,0	77,3	0,4	27,0	77,4	0,3		27,9	72,6	0,9		27,1	76,6	0,6	
01-07-2002	27,0	28,2	76,0	0,8	28,1	76,0	0,8		29,3	70,8	1,4		28,4	74,8	1,1	
01-08-2002	27,3	28,4	82,3	1,0	28,3	82,3	1,0		29,5	76,8	1,6		28,7	80,7	1,3	
01-09-2002	27,7	28,7	79,1	1,1	28,6	79,2	1,1		29,9	73,5	1,7		29,0	77,7	1,4	
01-10-2002	27,5	28,4	77,5	1,3	28,3	77,5	1,3		29,4	72,9	1,9		28,5	76,7	1,7	
01-11-2002	25,9	27,4	72,3	0,9	27,4	72,5	0,8		28,3	67,9	1,6		27,4	71,8	1,3	
01-12-2002	23,1	25,2	63,8	0,0	25,1	64,1	0,0		26,4	59,3	1,0		25,5	62,7	0,7	

Os resultados apresentados na tabela 10 mostram a redução significativa das temperaturas dentro da casa e também da humidade relativa, resultando numa melhoria significativa dos índices de conforto comparativamente aos registados na casa não ventilada, o que confirma o efeito benéfico da ventilação natural.

4.5.3.1 Estimativa e caracterização de consumo energético

Os gráficos apresentados na figura seguinte evidenciam as melhorias obtidas com o sistema de climatização mecânica avaliado. A temperatura operativa média anual diminuiu de 32°C para 25°C e a humidade relativa média anual também diminuiu de 66% para 61,6%. A otimização destes indicadores de conforto contribui para melhorar o índice PMV médio anual, que passa a estar dentro dos limites de conforto.

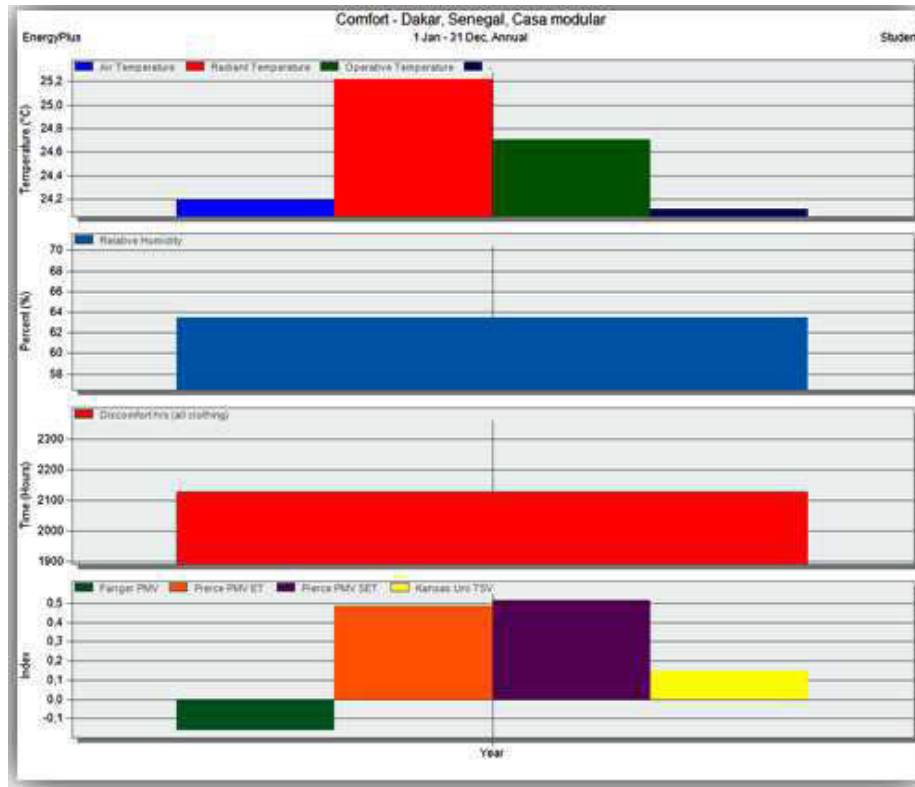


Figura 22 - Gráficos das médias anuais de temperatura, humidade relativa e índices de conforto do interior da casa referência com climatização mecânica.

Tabela 11 - Médias mensais de temperatura ambiente no exterior e da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de *Fanger* no interior da casa referência, com climatização.

Data	Quarto Oeste				Quarto Leste				Sala/ Cozinha				WC			
	T. A. °C	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV		T.Op. °C	HR	PMV		T.Op. °C	HR	PMV	
01-01-2002	20,2	24,0	52,4	-0,5	24,0	52,3	-0,5		24,9	49,3	0,5		23,5	55,0	0,1	
01-02-2002	20,3	23,9	58,1	-0,5	23,9	58,0	-0,5		24,9	54,0	0,5		23,2	61,2	0,1	
01-03-2002	20,8	24,2	64,4	-0,4	24,2	64,3	-0,4		25,1	58,1	0,6		23,1	66,5	0,1	
01-04-2002	21,2	24,2	67,6	-0,9	24,2	67,6	-0,9		25,1	60,7	-0,2		22,8	69,3	-1,0	
01-05-2002	23,0	24,4	69,3	-0,8	24,4	69,2	-0,8		25,5	61,7	-0,1		23,5	70,2	-0,8	
01-06-2002	25,1	24,7	69,5	-0,7	24,7	69,3	-0,7		25,6	62,6	-0,1		23,9	70,3	-0,6	
01-07-2002	27,0	25,1	69,0	-0,5	25,2	68,5	-0,5		25,4	62,7	-0,1		24,6	68,6	-0,4	
01-08-2002	27,3	24,6	70,9	-0,7	24,7	70,3	-0,7		24,5	65,6	-0,4		24,0	70,8	-0,6	
01-09-2002	27,7	25,0	69,7	-0,6	25,0	69,5	-0,6		24,6	65,2	-0,4		24,3	69,7	-0,5	
01-10-2002	27,5	24,8	71,1	-0,1	24,7	70,5	-0,2		24,5	65,6	0,5		24,0	71,8	0,4	
01-11-2002	25,9	25,0	66,3	-0,1	25,0	66,3	-0,1		25,5	60,6	0,7		24,2	67,4	0,4	
01-12-2002	23,1	24,7	62,6	-0,2	24,7	62,6	-0,2		25,5	56,4	0,7		23,9	63,5	0,3	

As temperaturas e os valores de humidade relativa alcançados com a implementação dos sistemas de expansão direta diminuem consideravelmente e a casa passa a ter condições de habitabilidade desejáveis, com temperatura e humidade relativa sempre muito próximas dos *setpoints* definidos.

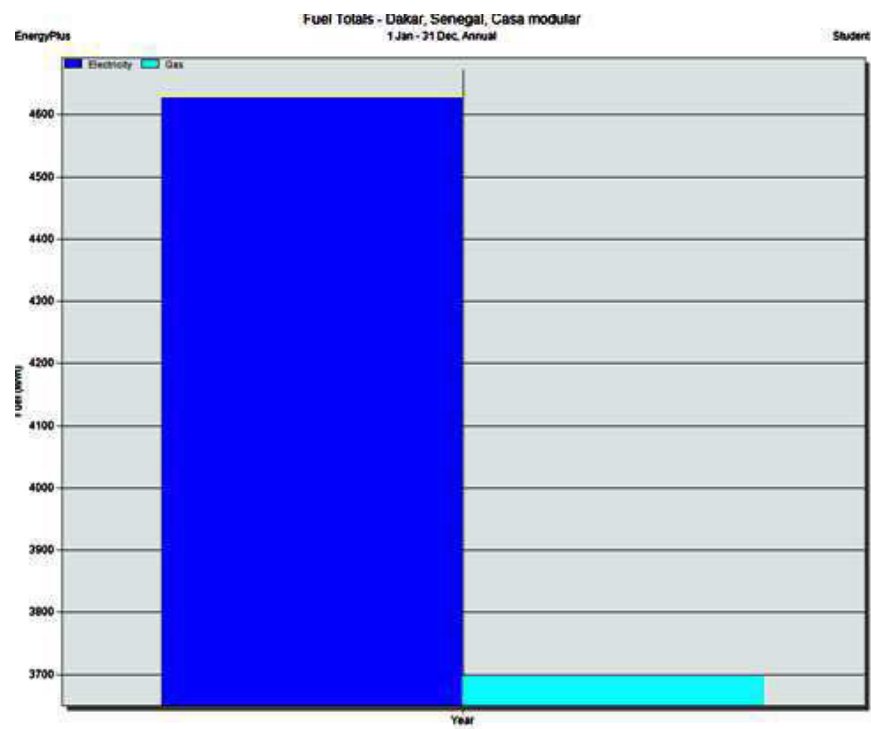


Figura 23 - Consumos energéticos totais anuais na casa referência sem climatização.

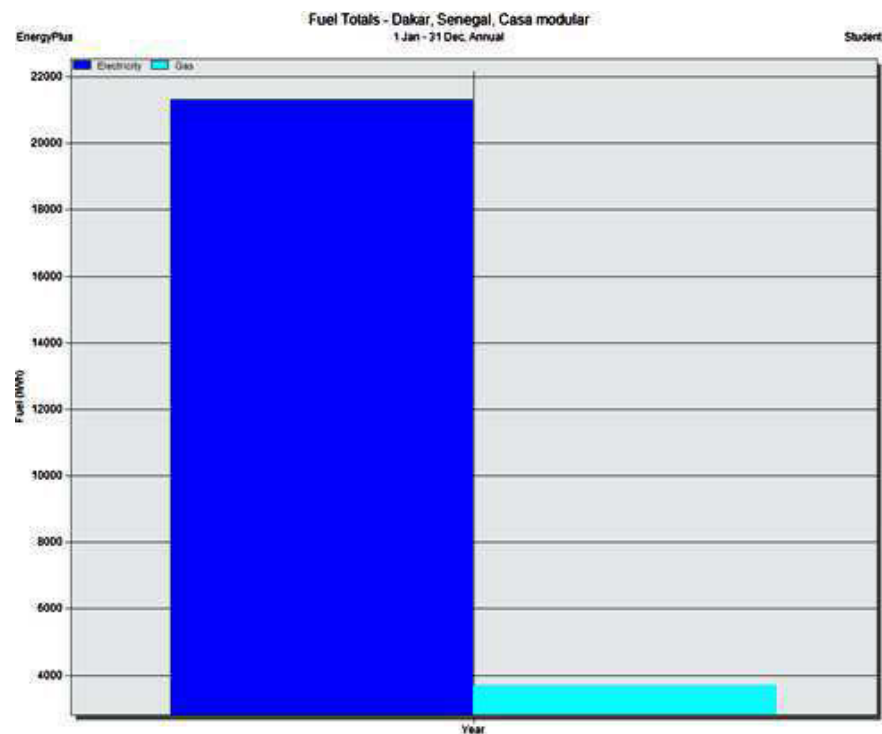


Figura 24 - Consumos energéticos totais anuais na casa referência com climatização.

No entanto o alcance das condições de habitabilidade desejáveis implica consumos de energia muito elevados como é visível nos gráficos das figuras 23 e 24. O consumo anual de eletricidade sobe de 4.625,955kWh no modelo de referência não climatizado para 21.298,79 kWh na casa com ar condicionado.

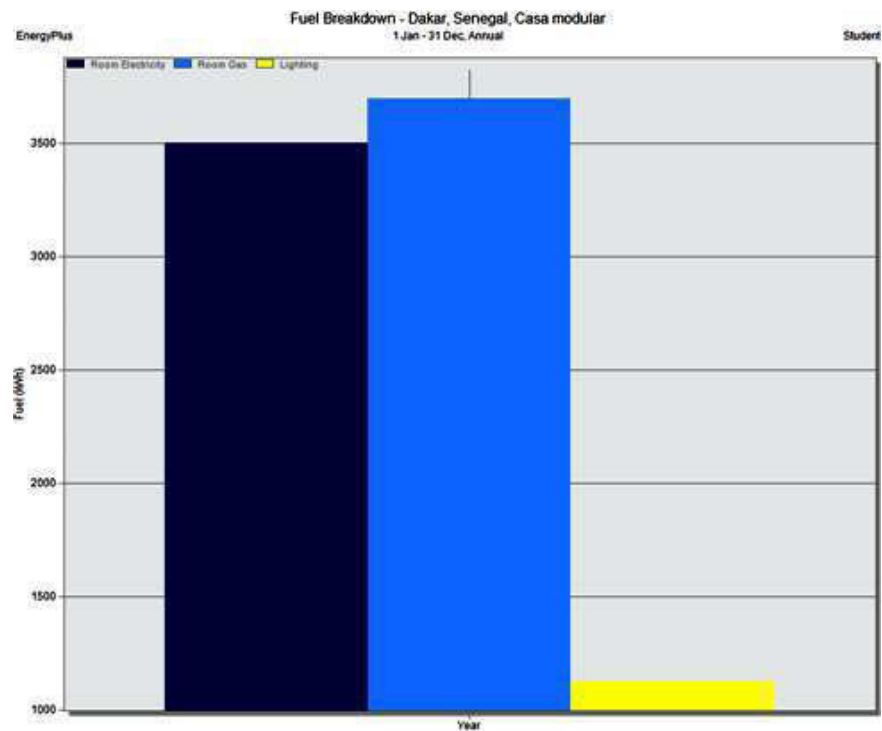


Figura 25 – Consumos energéticos anuais desagregados na casa referência sem climatização mecânica.

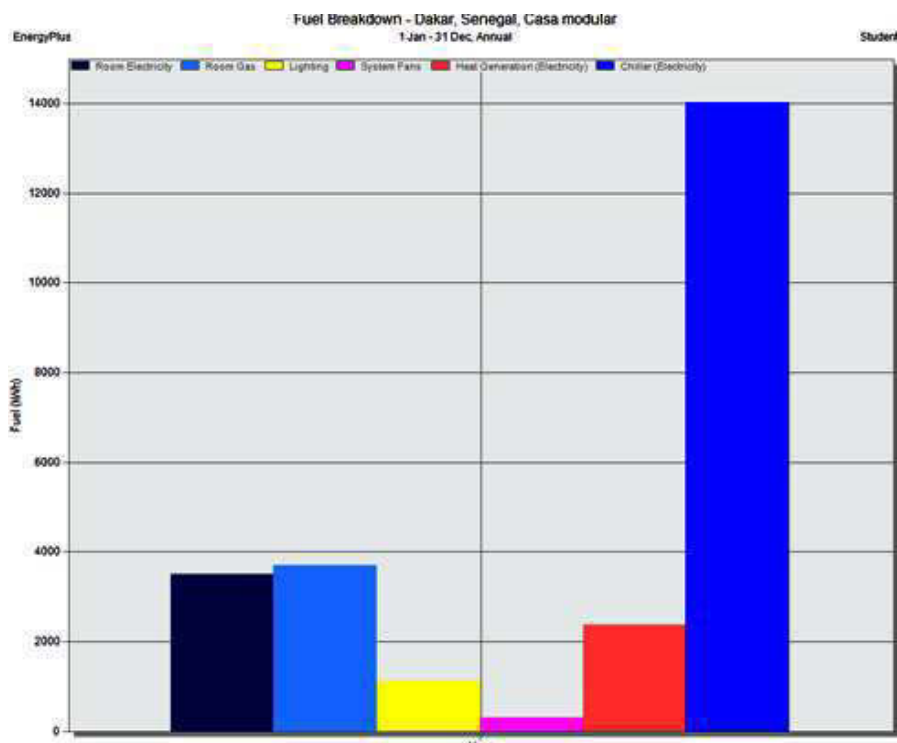


Figura 26 – Consumos energéticos anuais desagregados na casa referência com climatização mecânica.

4.5.4 Discussão da solução proposta

As figuras 27 e 28 mostram a influência no balanço térmico dos ganhos internos devido à ocupação, equipamentos instalados, iluminação e das componentes do envelope da casa e da ventilação, ao longo dum ano, permitindo concluir que os ganhos térmicos provêm essencialmente dos ganhos internos e da cobertura. As paredes exteriores da casa referência são revestidas com alumínio que reflete muito a radiação e têm inércia muito fraca, o que contribui bastante para a dissipação de calor porque os elementos com estas características têm pouca capacidade de o reter. Este facto é evidenciado na figura 28 onde se observa a coluna correspondente às paredes exteriores com valor negativo. O mesmo se verifica para os envidraçados que por terem vidro simples apresentam uma condutividade mais elevada, favorecendo as perdas de calor. Também se registam perdas de calor por condução bastante acentuadas através do pavimento, o que se justifica porque a temperatura superficial do solo é quase sempre mais baixa do que a temperatura ambiente no interior da casa solo, o que faz com que nos edifícios, as perdas de calor através dos pavimentos possam ser bastante elevadas principalmente em pisos térreos, ou seja em contacto com o solo.

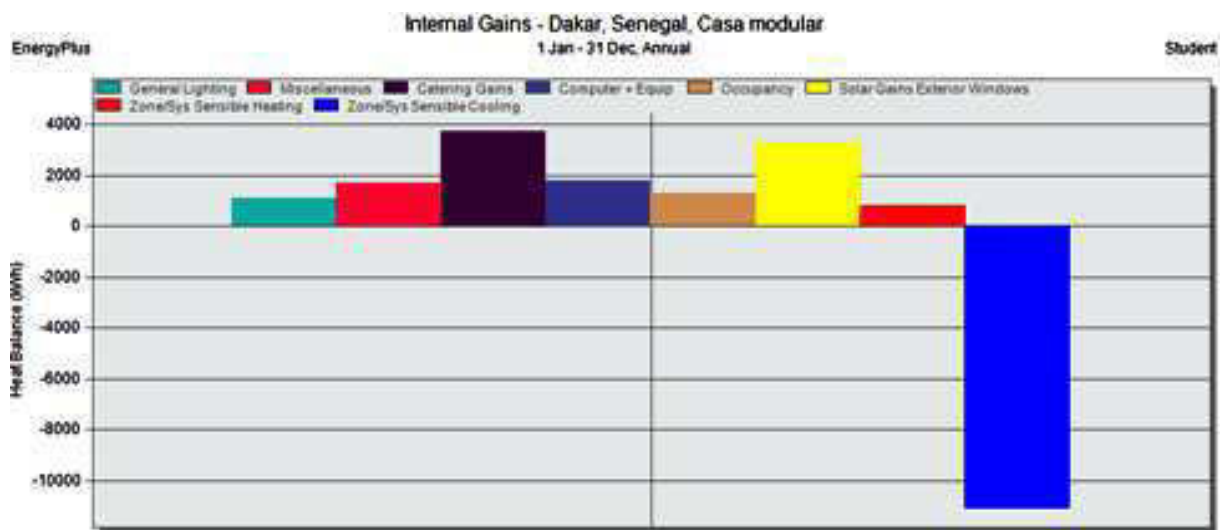


Figura 27– Balanço térmico na casa referência climatizada, devido aos ganhos internos por equipamentos, iluminação, ocupação e ganhos solares através dos envidraçados, e arrefecimento/aquecimento sensíveis.

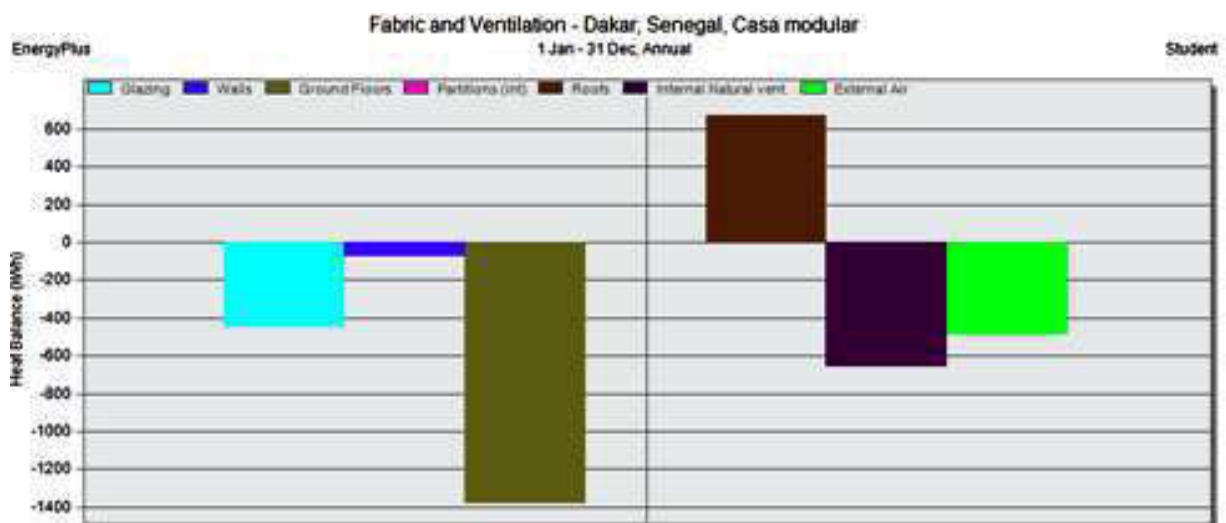


Figura 28 – Balanço térmico devido aos fluxos de calor através dos elementos construtivos e ventilação.

A inércia térmica média baixa da casa é prejudicial no que se refere ao consumo de energia para arrefecimento da casa que tem muitos ganhos térmicos, neste caso provenientes dos equipamentos, ocupação e da cobertura horizontal que está sujeita a radiação solar muito intensa. Assim, a casa referência não reúne condições de habitabilidade que é consequência do sobreaquecimento no seu interior registado ao longo de quase todo o ano. No entanto, as temperaturas elevadas dentro da casa proporcionam níveis de humidade relativa razoáveis, mas ainda assim, os índices de desconforto representados pelo PMV demonstram que este modelo não é habitável sem a introdução de um sistema de climatização eficiente.

A ventilação natural é considerada de extrema importância para a obtenção de uma casa confortável e efetivamente isso verifica-se para a casa de referência, pois a temperatura operativa média anual diminui bastante e o índice PMV médio anual também. Apesar da ventilação natural contribuir para se alcançarem níveis de conforto, na casa de referência as condições ideais só são possíveis, através da climatização com sistemas de ar condicionado. Neste caso opta-se por incluir equipamentos de climatização unitários de expansão direta, que permitem manter níveis de conforto desejáveis numa casa para ocupação permanente. Surge então o problema subjacente ao consumo excessivo de energia elétrica que certamente é insustentável para uma família que habite numa residência deste tipo, além de que em regiões inóspitas e em emergência económica como o Senegal, o acesso à energia elétrica ainda está longe de ser uma realidade em muitas regiões. Pelas razões apresentadas o ideal é otimizar as soluções construtivas de referência de forma a minimizar as necessidades de climatização.

4.6 Estudo de otimização para climas tropicais

O objetivo principal deste trabalho é projetar uma pequena casa modular para ocupação permanente, de forma a obter conforto térmico, com o mínimo consumo energético, no clima tropical quente e húmido que caracteriza o Dakar, capital do Senegal, e muitos outros territórios Africanos.

4.6.1 Principais Constrangimentos

Neste trabalho confirmam-se as dificuldades em projetar uma casa num clima tropical quente e húmido que, segundo Szokolay ^[23], é o mais difícil, devido nomeadamente às altas taxas de humidade e aos problemas associados às chuvas intensas concentradas em pequenos períodos do ano, neste caso no Verão.

O clima é o maior obstáculo pois a taxa de humidade é mais elevada durante o Verão, quando as temperaturas são mais elevadas, dificultando o arrefecimento de casa através de métodos passivos, gerando desconforto físico, e portanto, índices de PMV fora da zona de conforto.

Mais difícil se torna encontrar soluções quando se está perante um cenário de escassez de recursos energéticos, concretamente do fornecimento de energia elétrica, problema que poderia ser facilmente resolvido através da instalação de energia fotovoltaica, se o investimento inicial não fosse elevado. Conclui-se que a eficiência energética na casa alvo do estudo deve ser alcançada através de soluções passivas.

Outros constrangimentos estão relacionados com algumas limitações do *Energyplus* que por exemplo não pode simular um modelo com cobertura verde e com paredes que integrem PCMs, isto porque os métodos algorítmicos exigidos são distintos: a cobertura verde tem que ser simulada pelo método algorítmico CTF (que não contabiliza o armazenamento de calor latente), no entanto, o efeito do PCMs só é considerado se for selecionado o método das diferenças finitas ^[96]. Logo, não é possível simular um modelo com cobertura verde e com paredes exteriores com PCMs em simultâneo.

4.6.2 Estratégia de otimização

A otimização da casa referencia passa essencialmente pela substituição dos elementos construtivos por outros que permitam reduzir os custos com a climatização dos espaços. Os materiais de construção de uma casa devem ser cuidadosamente selecionados, dando-se especial atenção à densidade, condutividade, calor específico e cor, propriedades que influenciam o comportamento térmico.

São aplicadas estratégias de *design* passivo e de ventilação natural, na unidade habitável, que já foram introduzidas no capítulo três, tirando-se partido das qualidades dos materiais utilizados, à semelhança do que já foi feito por *Jean Prouvé* nas casas tropicais que criou durante os anos sessenta.

4.6.3 Soluções construtivas avaliadas

São avaliadas diversas soluções construtivas tendo como principal objetivo fazer variar a inércia dos diversos elementos e consequentemente a espessura, densidade e propriedades térmicas tais como calor específico e condutividade e, consequentemente a resistência térmica. Assume-se que a inércia térmica pode ter uma grande influência no comportamento térmico da pequena casa em estudo, tal como já foi referido no capítulo anterior, prevendo-se que as soluções construtivas com inércia forte são as que apresentam consumos energéticos para climatização mais reduzidos, principalmente durante a estação de arrefecimento.

Na tentativa de se manter a leveza dos materiais, uma vez que se trata de uma casa modular foram experimentados materiais que sendo compatíveis com o tipo de construção em causa, também são dotados de propriedades térmicas favoráveis, tais como PCMs e reboco leve reforçado com fibra de vidro e esferovite. Alguns dos materiais são ecológicos, nomeadamente os BioPCMs e outros como o reboco reforçado consistem num compósito que inclui materiais reutilizados (fibra de vidro e esferovite). Realce-se que não é objetivo da dissertação avaliar o impacto ambiental dos elementos construtivos nem mesmo fazer a sua análise económica.

Praticamente todas as soluções construtivas que foram introduzidas no capítulo três são experimentadas de modo a avaliar a sua performance na casa modular localizada em ambiente tropical.

Paredes exteriores

Na construção leve, em resultado da baixa massa térmica dos edifícios, a necessidade de manter a temperatura dentro do intervalo de conforto térmico implica elevados consumos energéticos. A utilização de PCMs ajuda a controlar a temperatura de forma passiva, reduzindo os picos térmicos, o que diminui os consumos associados aos sistemas de climatização ^[97]. Os PCMs podem contribuir para aumentar a eficiência dos sistemas de aquecimento ou arrefecimento e ajudar a melhorar o conforto térmico no interior dos edifícios ^[97]. A utilização em placas de gesso cartonado tem sido uma das aplicações mais investigada. Numa fase inicial as placas eram impregnadas com PCMs, mas a evolução das técnicas de encapsulamento nos últimos anos permitiu a incorporação direta no gesso, resultando no aparecimento de alguns produtos comerciais ^[97]. A parede 1 inclui BioPCMs, aplicados pelo interior a seguir a uma camada exterior de gesso. Este elemento apresenta a vantagem de ser um eco material 100 % biodegradável, aliado à elevada eficácia de armazenamento térmico.

No entanto, e apesar de se destacar, nos capítulos anteriores, a importância da utilização de materiais ecológicos associados à construção modular sustentável, não é objetivo do trabalho especificar todos os materiais mas sim caracterizar as soluções construtivas relativamente às suas propriedades físicas e térmicas, e que são determinantes no comportamento térmico de uma habitação.

São testadas diversas soluções com estrutura em aço leve (light steel framing, muito utilizado em casas modulares). Os painéis em LSF não são desprezados para não negligenciar o efeito das pontes térmicas, ainda que este seja mínimo. “No caso da construção LSF, pelo menos a cada 60 centímetro existe um perfil metálico, o que também interrompe o isolamento térmico colocado na cavidade da parede. No entanto, estes perfis são extremamente delgados, usualmente com pouco mais de 1 mm de espessura, sendo que todo o esqueleto metálico é ainda revestido com materiais de isolamento térmico” ^[98].

Em todas as soluções com exceção da parede de água (parede 8), é aplicado o isolamento térmico, utilizando materiais adequados, de forma a dificultar a dissipação de calor. Certos materiais, tais como as lãs minerais ou o EPS, dificultam a condução térmica ^[99], reduzindo todas

as formas de transferência de calor por condução através da envolvente do edifício, o que é muito conveniente em locais onde a diferença de temperatura entre o interior e o exterior é elevada, originando um fluxo de calor estabelecido por condução também elevado.

São ainda avaliadas paredes com betão leve reforçado com fibra de vidro e esferovite, material com densidade baixa mas com resistência elevada. Efetivamente existem diversos agregados que podem ser provenientes de materiais naturais (tais como pedra-pomes, diatomite, argila expandida ou xisto expandido, etc), subprodutos transformados (tais como espuma de escória) ou materiais não processados. A densidade deste material que é aplicado em paredes com estrutura em LSF, é igual a 800 kg/m³. Trata-se de um material que permite uma construção mais rápida.

Tabela 12 – Soluções construtivas avaliadas para paredes exteriores.

Materiais e propriedades térmicas dos elementos construtivos						
Paredes exteriores						
Material	δ (m)	λ (W/m-K)	ρ (Kg/m ³)	C_p (J/kg-K)	R-value (m ² -K/W)	U-Value (W/m ² -K)
Parede 1	exterior	0,003	0,036	1500		
	2	0,06	0,12	800	900	
	3	0,003	0,035	25	1400	
	4	0,152	0,036	30	840	5,456
	5	0,012	0,2	860	1620	
	6	0,026	0,25	900	1000	
	interior	0,006	0,052	200		0,183
Parede 2	exterior	0,003	0,036	1500		
	2	0,06	0,12	800	900	
	3	0,003	0,035	25	1400	
	4	0,152	0,036	30	840	4
	5	0,005	0,041	25	1000	
	6	0,06	0,12	800	900	
	interior	0,012	0,052	200		0,25
Parede 3	exterior	0,003	0,036	1500		
	2	0,06	0,12	800	900	
	3	0,003	0,035	25	1400	
	4	0,152	0,036	30	840	5,396
	5	0,026	0,25	900	1000	
	interior	0,006	0,052	200		0,185
Parede 4	exterior	0,003	0,036	1500		
	2	0,06	0,12	800	900	
	3	0,003	0,035	25	1400	
	4	0,152	0,036	30	840	6,086
	5	0,03	0,035	30	1000	
	6	0,013	0,25	900	1000	
	interior	0,006	0,052	200		0,164
Parede 5	exterior	0,1	0,84	1700	800	
	2	0,152	0,036	30	840	
	3	0,1	1,63	2300	1000	4,605
	interior	0,013	0,4	1000	1000	0,217
Parede 6	exterior	0,01	50	7800	450	
	2	0,04	0,038	40	840	1,223
	interior	0,01	50	7800	450	0,818
Parede 7	exterior	0,02	0,06	300	1000	
	2	0,06	0,035	25	1000	2,298
	interior	0,02	0,25	900	1000	0,435
Parede 8	exterior	0,01	50	7800	450	
	2	0,04	0,6	1000	4190	0,237
	interior	0,01	50	7800	450	4,218

São avaliadas três modalidades da parede 1 com três tipos de Bio PCM distintos, Bio PCM 182/Q23 (ponto de fusão aos 23⁰C), Bio PCM182/Q25 (ponto de fusão aos 25⁰C) e Bio PCM182/Q27 (ponto de fusão aos 27⁰C).

Cobertura

À semelhança dos restantes elementos que formam a envolvente, a eficácia de uma cobertura depende da massa térmica, isolamento, cor exterior e também da geometria e ventilação. No entanto, este elemento reveste-se de especial importância porque em regiões equatoriais a radiação solar é mais intensa na superfície horizontal do que nas paredes verticais.

Os telhados avaliados são sempre planos já que se trata de uma habitação modular, mas devido à probabilidade de sobreaquecimento interior a partir da superfície horizontal, são testadas soluções com proteções térmicas p.ex. barreiras radiantes, sendo exemplos de revestimentos de controlo de radiação emulsões de asfalto, resinas ou tintas que são aplicados na fase líquida, normalmente sobre revestimentos de impermeabilização de coberturas.

As barreiras radiantes, chamadas de sistemas de isolamento refletivo ^[58], são constituídas por alumínio ou poliéster metalizado ^[55], podendo ser combinadas de diversas formas (com folha de papel *Kraft*, com uma rede de reforço, com polietileno alveolar ou extrudido). A solução avaliada, mais parecida com esta é a cobertura 8.

A cobertura 3 é uma solução muito idêntica ao telhado evapo-reflexivo introduzido no capítulo anterior, composta por um teto de betão com um leito de pedras, água, com um espaço de ar separado do ambiente exterior por uma placa de alumínio pintada de branco.

A solução 7 é uma cobertura verde extensiva, com a composição já apresentada no capítulo três, exigindo pouca manutenção.

Materiais de isolamento térmico também integram quase todas as soluções apresentadas com exceção das coberturas 3, 4 e 6.

O efeito dos materiais de mudança de fase também é testado na cobertura 1, que inclui Bio PCMs M182/Q 27, aplicados pelo interior.

Tabela 13- Soluções construtivas avaliadas para coberturas.

Materiais e propriedades térmicas dos elementos construtivos							
Coberturas							
	Material	δ (m)	λ (W/m-K)	ρ (Kg/m ³)	C_p (J/kg-K)	R-value (m ² -K/W)	U-Value (W/m ² -K)
Cobertura 1	Exterior	0,2	0,16	500	840	5,72	0,175
	2	0,152	0,036	30	840		
	3	0,012	0,2	860	1620		
	Interior	0,012	0,25	2800	896		
Cobertura 2	Exterior	0,2	0,16	500	840	5,66	0,177
	2	0,152	0,036	30	840		
	Interior	0,012	0,25	2800	896		
Cobertura 3	Exterior	0,005	204	2750	936	0,57	1,754
	2	0,1	0,3	1000	1000		
	3	0,07	0,63	990	4190		
	4	0,1	2,3	2600	1000		
	Interior	0,1	1,8	2400	1080		
Cobertura 4	1	0,2	0,16	500	840	1,39	0,719
Cobertura 5	Exterior	0,01	0,7	2100	1000	3,999	0,25
	2	0,1445	0,04	12	840		
	3	0,025	0,3	1000	1000		
	Interior	0,013	0,25	2800	896		
Cobertura 6	1	0,3	0,12	800	900	2,64	0,379
Cobertura 7	Exterior	0,1	0,3	1000	1000	1,134	0,882
	2	0,07	1,18	1800	1250		
	3	0,025	0,25	1200	1800		
	4	0,07	0,36	1840	840		
	5	0,01	0,035	25	1400		
	6	0,01	0,5	1700	1000		
	Interior	0,05	50	7800	450		
Cobertura 8	Exterior	0,02	204	2750	936	3,712	0,269
	Interior	0,1	0,028	35	1590		

Pavimentos

A redução de perdas de calor através dos pavimentos em contacto directo com o solo pode ser conseguida com a aplicação de isolamento. Nos pavimentos em contacto com o solo deve-se colocar isolamento térmico sob a laje, potenciando assim a inércia térmica do edifício, e deve-se utilizar como isolamento um material que não altere a resistência térmica por estar em contacto com o solo. A estrutura que suportar o isolamento deve ser rígida para evitar a perda de massa, também devendo, no entanto, ser permeável para deixar escapar o vapor de água do interior.

Devido à importância do isolamento térmico na constituição dos pavimentos, quase todas as soluções propostas com exceção dos pavimentos 8 e 9 incluem esta componente. São avaliados pavimentos com inércia baixa, média e alta, e praticamente todos eles incluem isolamento,

sempre aplicado pelo exterior, precisamente para não influenciar a massa térmica do elemento. São avaliados pavimentos com diversos tipos de soalho: madeira, cerâmica, polímeros (poliolefina), que revestem lajes feitas com betão de elevada densidade, ou betão leve reforçado.

Tabela 14 - Soluções construtivas avaliadas para pavimentos.

Materiais e propriedades térmicas dos elementos construtivos							
Pavimentos							
	Material	δ (m)	λ (W/m-K)	ρ (Kg/m ³)	C_p (J/kg-K)	R-value (m ² -K/W)	U-Value (W/m ² -K)
Pavimento 1	Exterior	0,1327	0,04	10	1400	4,001	0,25
	2	0,1	1,13	2000	1000		
	3	0,07	0,41	1200	840		
	Interior	0,03	0,14	650	1200		
Pavimento 2	Exterior	0,001	0,04	10	1400	0,665	1,503
	2	0,12	2,5	2400	1000		
	3	0,08	0,22	720	840		
	Interior	0,015	0,8	1700	850		
Pavimento 3	Exterior	0,005	0,04	15	1400	0,399	2,507
	2	0,05	0,88	2800	896		
	Interior	0,01	1,4	2500	840		
Pavimento 4	Exterior	0,005	0,04	15	1400	0,422	2,371
	2	0,07	0,88	2800	896		
	Interior	0,01	1,4	2500	840		
Pavimento 5	Exterior	0,005	0,04	15	1400	0,497	2,01
	2	0,05	0,88	2800	896		
	Interior	0,005	0,041	160	1000		
Pavimento 6	Exterior	0,005	0,04	15	1400	0,463	2,159
	2	0,05	0,88	2800	896		
	Interior	0,01	0,14	650	1200		
Pavimento 7	Exterior	0,001	0,04	10	1400	1,087	0,92
	2	0,1	0,12	800	900		
	Interior	0,015	0,8	1700	850		
Pavimento 8	1	0,12	2,5	2400	1000	0,258	3,876
Pavimento 9	Exterior	0,1	1,13	2000	1000	0,513	1,95
	Interior	0,03	0,14	650	1200		

Envidraçados

Considerando que as casas com inércia mais fraca têm maior capacidade de aquecimento, então é muito importante escolher caixilharias e vidros de melhor qualidade, além de proteger os envidraçados preferencialmente pelo exterior com dispositivos de proteção solar. Os parâmetros mais importantes no dimensionamento de envidraçados com desempenho energético adequado são o coeficiente de transmissão térmica ou fator-U, fator solar (fator-g, ou SHGC), que é o quociente entre a energia solar transmitida através do vidro para o interior e a energia solar nele incidente, e o coeficiente de transmissão visível ou transmissão luminosa ou fator-TV, que é a percentagem da luz visível que atinge um envidraçado e que passa para o interior.

São experimentados diversos tipos de vidros, desde claros, sem impurezas, até transparentes com baixo teor de ferro, resultando em maior transmitância, e também coloridos (verde e cinza). Das soluções avaliadas, seis correspondem a vidros de controlo solar baixo emissivo (simples, duplos e triplos), pois reduzem os ganhos e perdas de calor pela radiação infravermelha de onda longa, diminuindo o valor-U (indicador de boa capacidade de isolamento) e aumentando a eficiência energética. Também são testados vidros refletivos com revestimento metálico para aumentar a reflexão solar: REF-A-L (refletivo com revestimento de transmitância baixa em aço inoxidável) e REF-A-H (refletivo com revestimento de transmitância elevada em aço inoxidável).

Tecnologias mais recentes são também avaliadas e incluem vidro duplo colorido eletrocromático que escurece, tornando-se mais absorvente, normal, ou com revestimento de baixa emissividade, e também soluções de vidros espectralmente seletivos, isto é, com parte do espectro solar preferencialmente transmitidos.

Para os elementos envidraçados especifica-se o tipo de vidro e a sua espessura, a composição dos elementos que complementam os envidraçados, a fim de avaliar o desempenho de diversas opções, de acordo com a variação das suas propriedades que mais influenciam o comportamento térmico da casa em estudo.

Tabela 15 - Soluções construtivas avaliadas para envidraçados.

Materiais e propriedades térmicas dos elementos construtivos				
Envidraçados				
	Transmissão solar total (SHGC)	Transmissão solar direta	Transmissão luminosa	U-Value (W/m ² -K)
1	0,503	0,373	0,505	3,094
2	0,7	0,604	0,781	3,094
3	0,733	0,635	0,752	2,429
4	0,197	0,08718	0,114	2,429
5	0,507	0,379	0,664	3,094
6	0,485	0,354	0,381	3,094
7	0,829	0,813	0,839	2,716
8	0,568	0,474	0,745	1,761
9	0,597	0,538	0,769	1,512
10	0,16	0,0518	0,09912	2,325
11	0,426	0,345	0,682	2,334
12	0,248	0,127	0,181	2,906
13	0,154	0,05319	0,07288	2,761
14	0,474	0,358	0,661	0,78
15	0,819	0,775	0,881	5,778
16	0,72	0,68	0,811	3,779

4.6.4 Estudo Paramétrico

O *DesignBuilder* permite fazer estudos paramétricos executando automaticamente várias simulações com ajustamento automático até duas variáveis para criar curvas de *design* que podem ser muito úteis durante a conceção de edifícios, pois permitem visualizar como o desempenho do edifício é afetado por variações. As curvas mostram como os parâmetros de desempenho, como as emissões de carbono, conforto, temperatura, consumos de energia, variam consoante os vários elementos de construção.

4.6.4.1 Variáveis de entrada e indicadores de desempenho

Os estudos paramétricos são efetuados para as variáveis de entrada paredes exteriores, pavimento térreo, coberturas planas e tipos de vidro, e os indicadores de desempenho, são o consumo energético para arrefecimento (kWh), consumo energético para aquecimento (kWh) e consumo total de energia (kWh).

As normas sobre o conforto térmico são uma ferramenta muito importante para projetar uma casa confortável. Inicialmente, as normas utilizadas tinham apenas em consideração o conforto térmico, mas devido às atuais preocupações ambientais têm também em conta os consumos energéticos necessários para atingir esse conforto. Daqui decorre o conceito de sustentabilidade, em que as normas de conforto térmico têm de considerar formas de atingir o menor consumo energético possível, sendo este o princípio que justifica a escolha dos indicadores de desempenho aplicados nos testes paramétricos.

PAREDES EXTERIORES

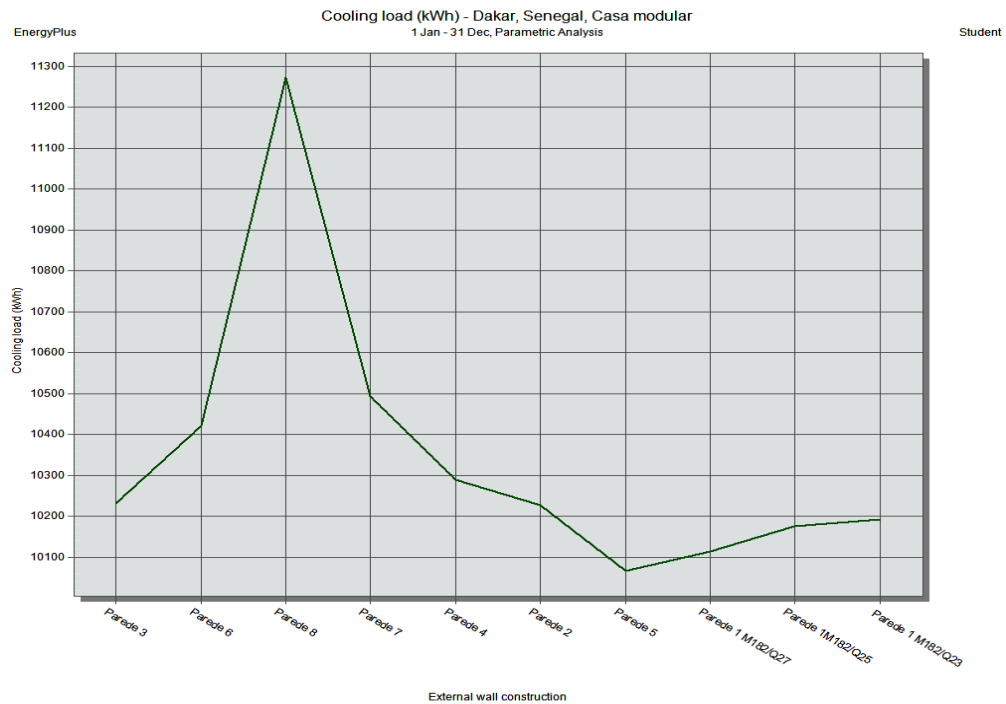


Figura 29 - Variação do consumo de energia para arrefecimento em função do tipo de parede exterior na casa referência.

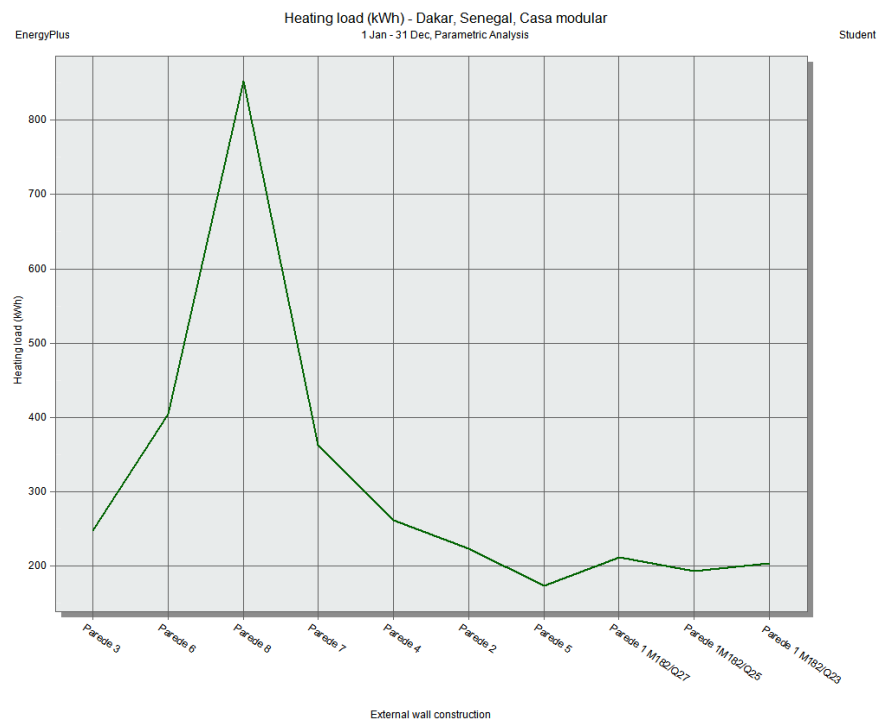


Figura 30 – Variação do consumo de energia para aquecimento em função do tipo de parede exterior na casa referência.

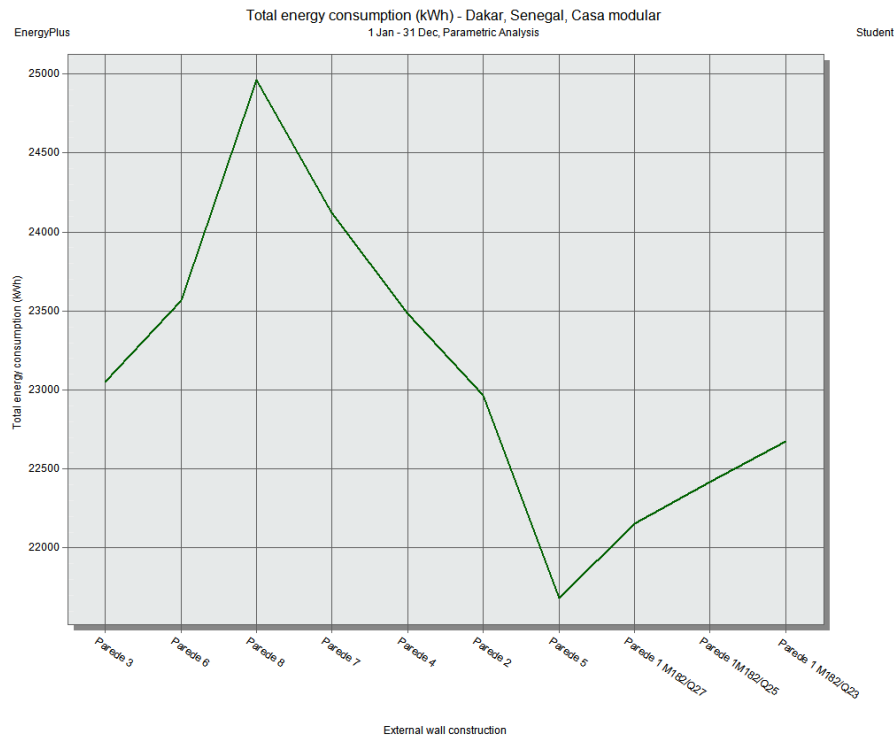


Figura 31 - Variação do consumo total anual de energia em função do tipo de parede exterior na casa referência.

Analisando os gráficos das figuras 29, 30 e 31, verifica-se que a solução que corresponde ao menor consumo de energia para a climatização da casa é a parede 5 que é caracterizada por inércia forte. No entanto, existem outras que são soluções mais eficazes durante a estação de arrefecimento (parede 1, 2, 3 e 4), todas elas com inércia mais fraca e com reboco leve reforçado na sua composição. A parede 1, que é a melhor solução a seguir à 5, inclui Bio PCMs na sua composição, aplicado pelo interior, que é revestido com gesso.

Verifica-se que as soluções construtivas com inércia forte são as que apresentam consumos energéticos mais reduzidos para climatização, seguindo-se as soluções com inércia média e por fim da inércia fraca. Os consumos com o aquecimento não variam muito com a inércia, embora se verifique que à inércia média correspondem valores mais baixos, seguindo da forte e por fim da fraca. Relativamente aos consumos para arrefecimento, as soluções com inércia elevada, apresentam consumos bastante mais reduzidos que as restantes. A parede com pior desempenho energético é a 8 e que corresponde a uma parede de água entre placas de aço, sem qualquer isolamento térmico. Esta é a única solução avaliada que não tem isolamento térmico na sua composição.

COBERTURAS

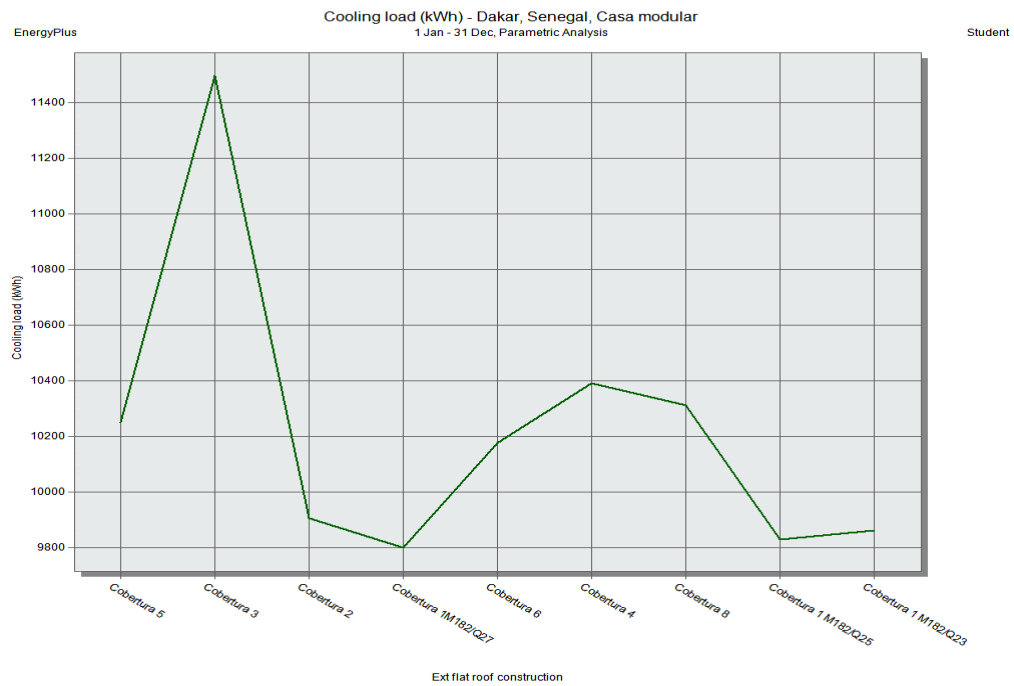


Figura 32 - Variação do consumo anual de energia para arrefecimento em função do tipo de cobertura na casa referência.

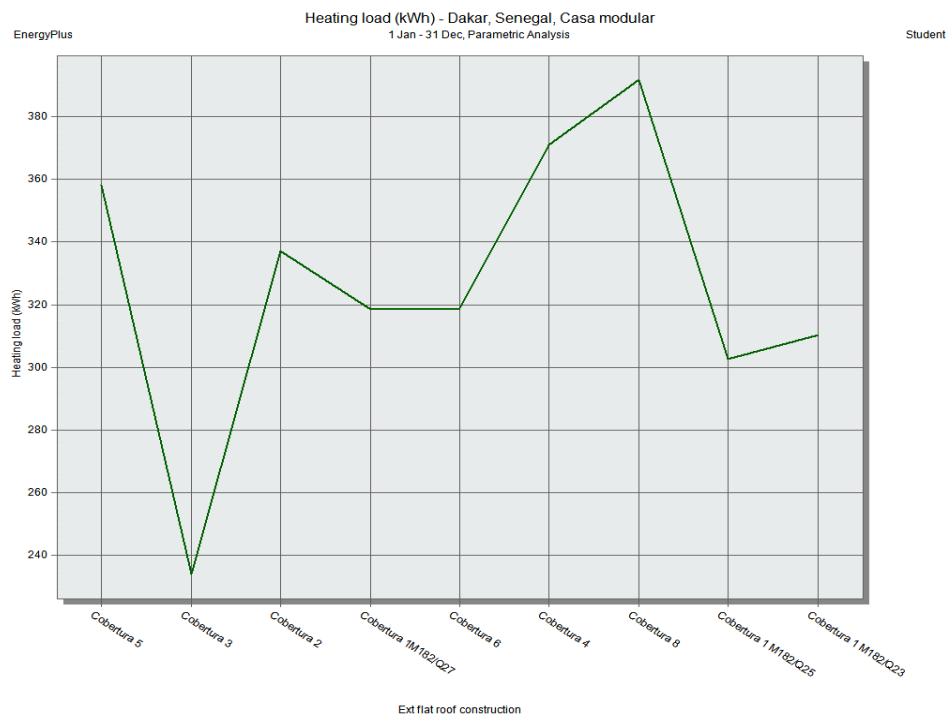


Figura 33 - Variação do consumo anual de energia para aquecimento em função do tipo de cobertura na casa referência.

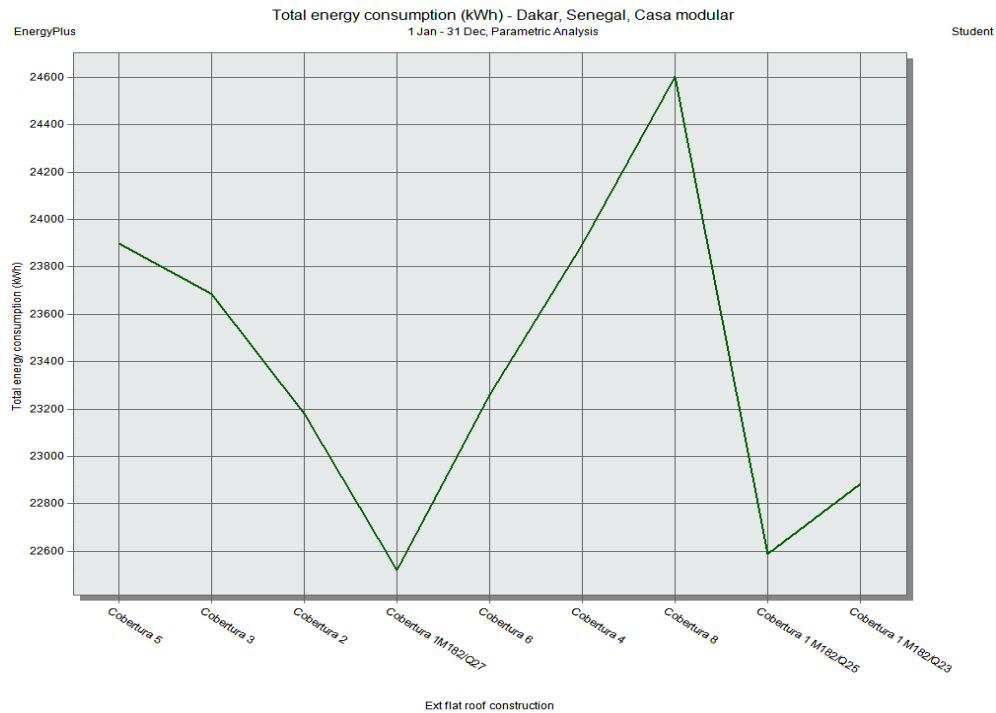


Figura 34 - Variação do consumo total anual de energia em função do tipo de cobertura na casa referência.

No gráfico da figura 34, verifica-se que a cobertura 1 é a que tem confere melhor desempenho energético à casa modular, seguida da 2, sendo a cobertura 8 a menos adequada ao clima em Dakar. A solução 1 corresponde a uma estrutura com perfis de aço leve e com BioPCM® M182/Q27, no interior. A solução 8 corresponde a uma cobertura com inércia nula, constituída por isolamento em poliuretano e revestimento em alumínio.

PAVIMENTOS

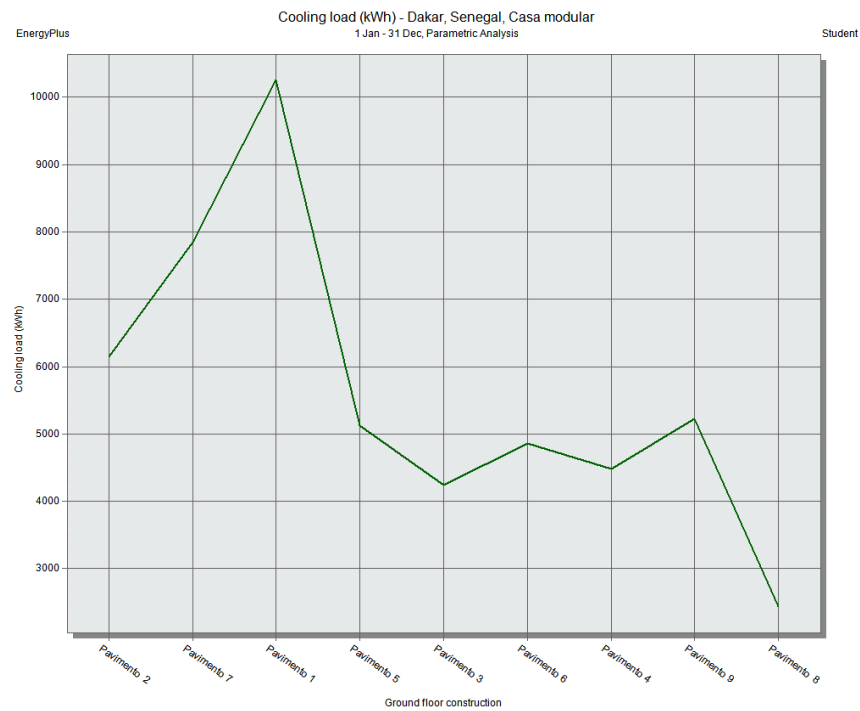


Figura 35 - Variação do consumo anual de energia para arrefecimento em função do tipo de pavimento na casa referência.

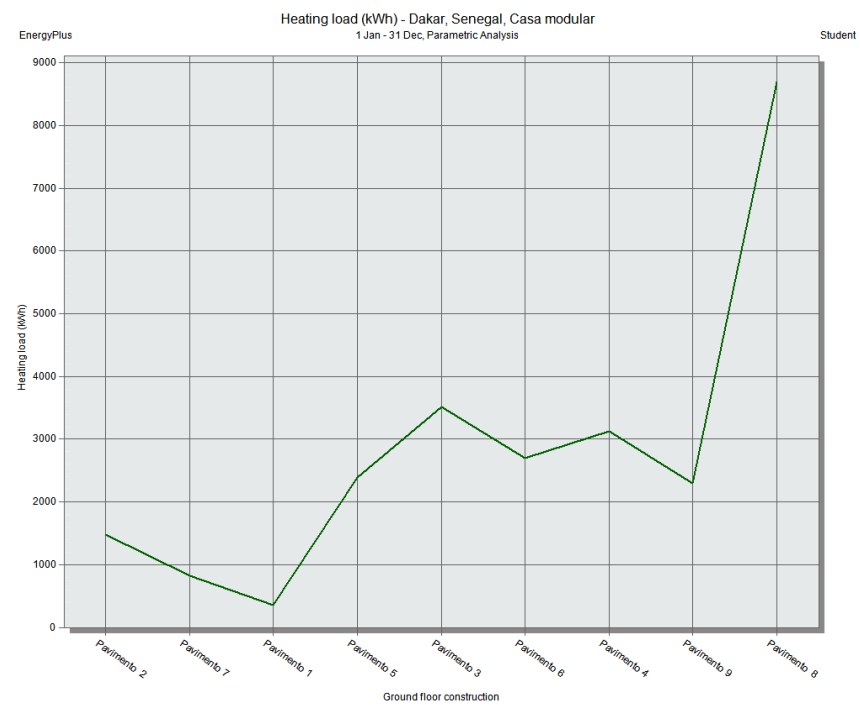


Figura 36 - Variação do consumo anual de energia para aquecimento em função do tipo de pavimento na casa referência.

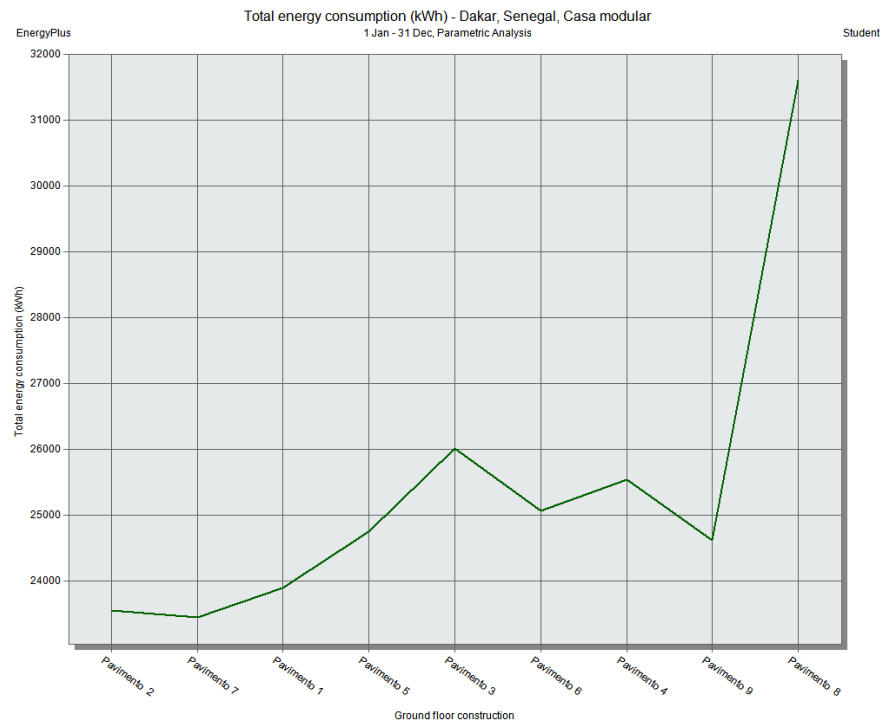


Figura 37 - Variação do consumo total anual de energia em função do tipo de pavimento na casa referência.

O pavimento 7 corresponde a uma solução com inércia baixa e é o que está associado ao consumo energético anual mais reduzido. Na sua composição integra isolamento de espuma de formaldeído de ureia, reboco reforçado e mosaicos de cerâmica. Os pavimentos 1 e 2 apresentam resultados semelhantes, apesar de terem inércia forte. No entanto também têm isolamento de espuma de formaldeído de ureia no exterior. O pavimento 8 está associado a consumos totais de energia elevados principalmente durante a estação de aquecimento, provavelmente devido à falta de isolamento térmico na sua composição, o que origina o aumento de perdas de calor.

ENVIDRAÇADOS

Neste caso são escolhidas duas variáveis de projeto, traçando-se o consumo de energia para arrefecimento, aquecimento e consumo total, em função da variação da % dos envidraçados em relação às paredes e também em função do tipo de vidros.

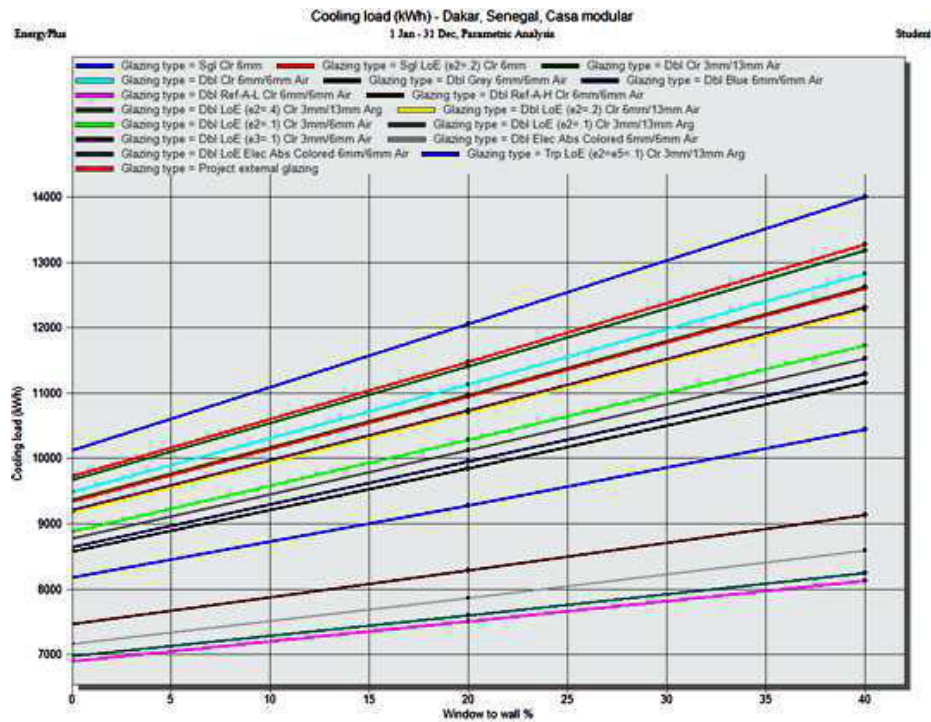


Figura 38 - Variação do consumo anual de energia para arrefecimento em função do tipo de vidro e da percentagem dos envidraçados em relação à parede na casa referência.

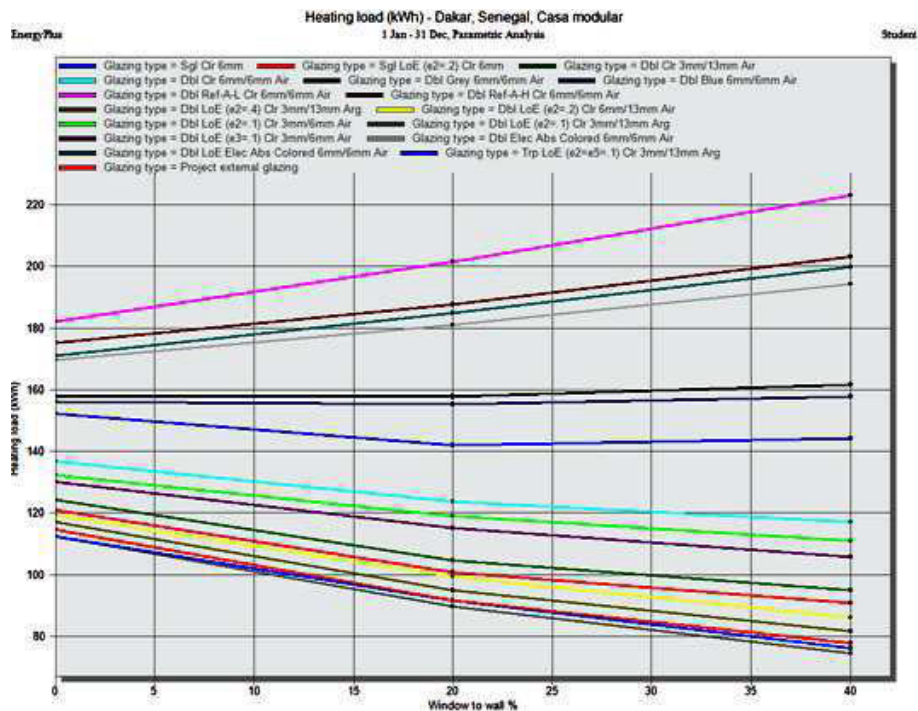


Figura 39 - Variação do consumo anual de energia para aquecimento em função do tipo de vidro e da percentagem dos envidraçados em relação à parede na casa referência.

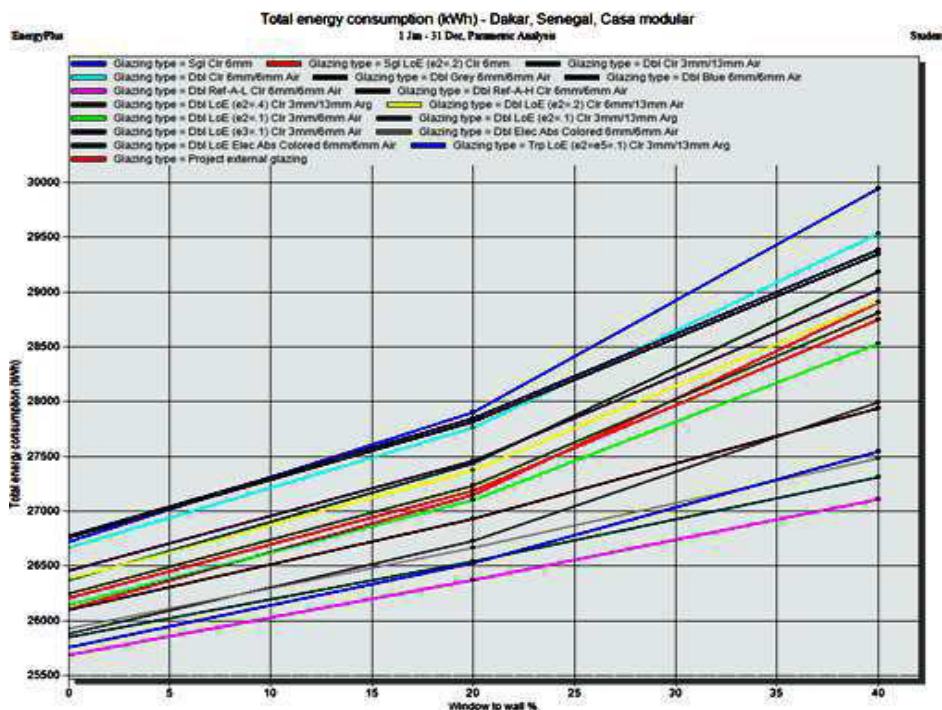


Figura 40 - Variação do consumo total anual de energia em função do tipo de vidro e da percentagem dos envidraçados em relação à parede na casa referência.

Da interpretação dos resultados gráficos conclui-se que o vidro com o consumo energético anual mais reduzido é o double Ref. A-L com 6 mm de espessura e 6mm de ar (refletivo com revestimento de transmitância baixa em aço inoxidável). Este tipo de vidro proporciona o menor consumo energético anual, durante a estação de arrefecimento, mas por outro lado é aquele que corresponde a consumos mais elevados durante o período de aquecimento o que se deve à transmissão solar total (SHGC) baixa que o caracteriza. Este vidro tem SHGC ou fator $g = 0,154$, coeficiente de transmissão térmica ou fator $U = 2,761 \text{ W/m}^2\text{-K}$, transmissão solar direta $= 0,05319$ e transmissão luminosa ou fator-TV $= 0,07288$. Neste estudo paramétrico obtem-se um resultado muito semelhante ao realizado em Chennai, na Índia^[34], também localizado perto do Equador ($13^{\circ} 00' \text{N}$, $80^{\circ} 11' \text{E}$), sobre a aplicação de vários tipos de janelas.

De acordo com os resultados obtidos nos testes paramétricos realizados na casa referência, os elementos construtivos que originam menor consumo energético total são a parede 5, a cobertura 1 M182/Q27, o pavimento 7 e o vidro double Ref. A-L com 6 mm de espessura e 6mm de ar, com caixilharia em alumínio e com corte térmico. De realçar que estes resultados são obtidos para os testes de parametrização realizados à casa referencia.

4.6.4.2 Caracterização da solução proposta

No seguimento dos resultados obtidos nas avaliações paramétricas, considera-se pertinente avaliar um modelo construtivo que conjugue todos os elementos construtivos subjacentes aos consumos energéticos mais reduzidos e que são a parede 5, a cobertura 1 M182/Q27, pavimento 7 e o vidro double Ref. A-L com 6 mm de espessura e 6mm de ar, com caixilharia em alumínio e com corte térmico.

No entanto, a parede 5 de inércia forte não é adequada para a construção modular uma vez que integra betão de alta densidade e também revestimento em alvenaria. Na realidade, esta solução é apenas testada para averiguar a importância da inércia alta no desempenho térmico.

Uma vez que se está a projetar uma construção modular, habitualmente caracterizada por materiais leves, considera-se que a parede 1, que integra reboco leve reforçado e Bio PCMs, 100% biodegradável, é uma solução muito mais adequada a este tipo de construção. O Bio PCM é incorporado na parede para aumentar a capacidade do armazenamento térmico e é revestido

com gesso cartonado que sendo um material poroso apresenta maior potencial de impregnação de PCMs.

A solução proposta para otimizar a casa referência, inclui os seguintes elementos construtivos: parede 1 M182/Q27 + cobertura 1 M182/Q27+ pavimento 7 + vidro Dbl Ref-A-L Clr 6mm/6mm Air, com caixilharia em alumínio e com corte térmico, paredes interiores de gesso e portas interiores em madeira. Também é avaliada uma solução alternativa idêntica à primeira mas substituindo a parede 1 M182/Q27 pela parede 5, servindo esta opção apenas para comparar a influência que a inércia térmica tem no consumo energético para climatização.

4.6.4.3 Comportamento térmico e de habitabilidade

À semelhança do que é feito para a casa referência, os indicadores escolhidos para avaliar as condições de conforto térmico dentro da casa são a temperatura operativa, a humidade relativa e o índice PMV de *Fanger*.

Tabela 16 - Médias mensais de temperatura ambiente no exterior, da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de *Fanger* no interior da casa otimizada, sem climatização.

Data	Quarto Oeste				Quarto Leste				Sala/ Cozinha				WC			
	T. A. °C	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV		T.Op. °C	HR	PMV		T.Op. °C	HR	PMV	
01-01-2002	20,2	21,8	59,2	-1,3	21,4	60,2	-1,4		25,1	47,9	0,6		22,3	58,2	-0,2	
01-02-2002	20,3	21,6	67,2	-1,3	21,4	67,8	-1,3		24,4	55,8	0,4		22,0	66,4	-0,2	
01-03-2002	20,8	22,4	72,6	-0,9	22,1	73,6	-1,0		25,6	58,9	0,8		22,9	71,3	0,1	
01-04-2002	21,2	22,8	76,7	-1,4	22,5	77,9	-1,5		25,9	62,4	0,2		23,3	75,4	-0,8	
01-05-2002	23,0	24,6	79,0	-0,6	24,2	80,4	-0,8		28,2	62,7	1,0		25,3	76,5	0,0	
01-06-2002	25,1	26,5	82,5	0,2	25,8	82,5	-0,1		30,5	62,8	1,9		27,4	76,8	0,8	
01-07-2002	27,0	29,0	82,7	1,3	27,8	84,9	0,8		33,2	61,0	2,9		30,0	75,6	1,8	
01-08-2002	27,3	29,0	88,2	1,4	28,0	89,7	1,0		33,1	66,2	2,9		30,0	81,2	1,9	
01-09-2002	27,7	29,2	86,3	1,5	28,3	87,5	1,0		33,4	64,3	3,0		30,2	79,1	1,9	
01-10-2002	27,5	28,6	83,5	1,5	27,8	84,8	1,2		32,4	63,8	2,8		29,5	77,6	2,0	
01-11-2002	25,9	27,9	78,4	1,1	27,0	78,1	0,8		31,7	58,0	2,5		28,6	71,4	1,7	
01-12-2002	23,1	24,5	66,7	-0,2	23,9	67,6	-0,4		27,7	53,8	1,3		24,8	65,0	0,6	

Avaliando a performance da solução proposta, em termos de conforto térmico, verifica-se que a casa, sem qualquer sistema de climatização natural ou mecânico, apresenta valores de temperatura mais baixos do que a casa referência, nas mesmas condições. No entanto as temperaturas são muito elevadas, durante praticamente todo o ano, revelando a necessidade de se proceder à climatização dos espaços.

A tabela seguinte resume os resultados obtidos na casa climatizada com os mesmos equipamentos de expansão direta projetados para a casa referência. Este sistema de climatização ativo origina uma casa confortável ligeiramente fresca nos quartos e WC, e com consumos energéticos mais baixos do que os obtidos na casa referência, baixando de 21.298,79 Kwh para 18.962,88 kwh de eletricidade por ano.

Tabela 17 - Médias mensais de temperatura ambiente no exterior e da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de *Fanger* no interior da casa otimizada com climatização mecânica.

Data	Quarto Oeste				Quarto Leste				Sala/ Cozinha				WC			
	T. A. °C	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV		T.Op. °C	HR	PMV		T.Op. °C	HR	PMV	
01-01-2002	20,2	23,6	52,3	-0,7	23,6	52,1	-0,7		24,5	49,9	0,4		22,8	56,2	0,0	
01-02-2002	20,3	23,5	57,7	-0,6	23,5	57,5	-0,6		24,3	54,9	0,4		22,5	62,4	-0,1	
01-03-2002	20,8	23,6	65,0	-0,5	23,6	64,8	-0,6		24,5	59,5	0,5		22,4	68,6	-0,1	
01-04-2002	21,2	23,6	68,8	-1,1	23,6	68,6	-1,1		24,4	62,8	-0,4		22,1	72,4	-1,2	
01-05-2002	23,0	23,5	71,8	-1,1	23,5	71,3	-1,1		24,8	63,8	-0,3		22,4	73,9	-1,2	
01-06-2002	25,1	23,6	74,9	-1,1	23,6	74,1	-1,1		24,4	65,5	-0,5		22,8	75,3	-1,0	
01-07-2002	27,0	24,0	76,3	-0,9	23,8	75,9	-1,0		24,6	65,6	-0,4		23,5	74,4	-0,7	
01-08-2002	27,3	23,8	78,8	-1,0	23,8	78,5	-1,0		22,8	67,9	-1,0		22,7	76,1	-1,0	
01-09-2002	27,7	24,0	77,0	-0,9	23,8	77,2	-1,0		23,2	67,7	-0,9		23,0	75,1	-0,9	
01-10-2002	27,5	24,3	77,8	-0,2	24,2	77,7	-0,3		22,9	68,3	0,1		23,3	77,4	0,3	
01-11-2002	25,9	24,0	71,5	-0,4	23,9	71,3	-0,4		24,9	62,6	0,6		23,5	71,4	0,3	
01-12-2002	23,1	23,8	64,1	-0,5	23,8	64,1	-0,5		25,2	57,5	0,7		23,2	66,1	0,1	

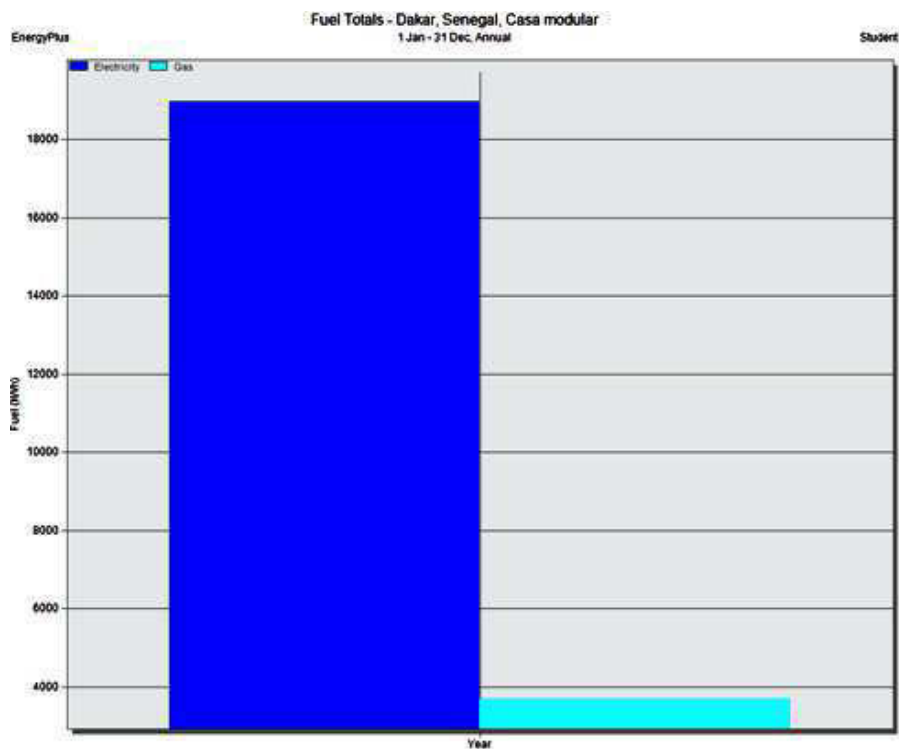


Figura 41 - Consumos energéticos anuais totais na casa otimizada com climatização mecânica.

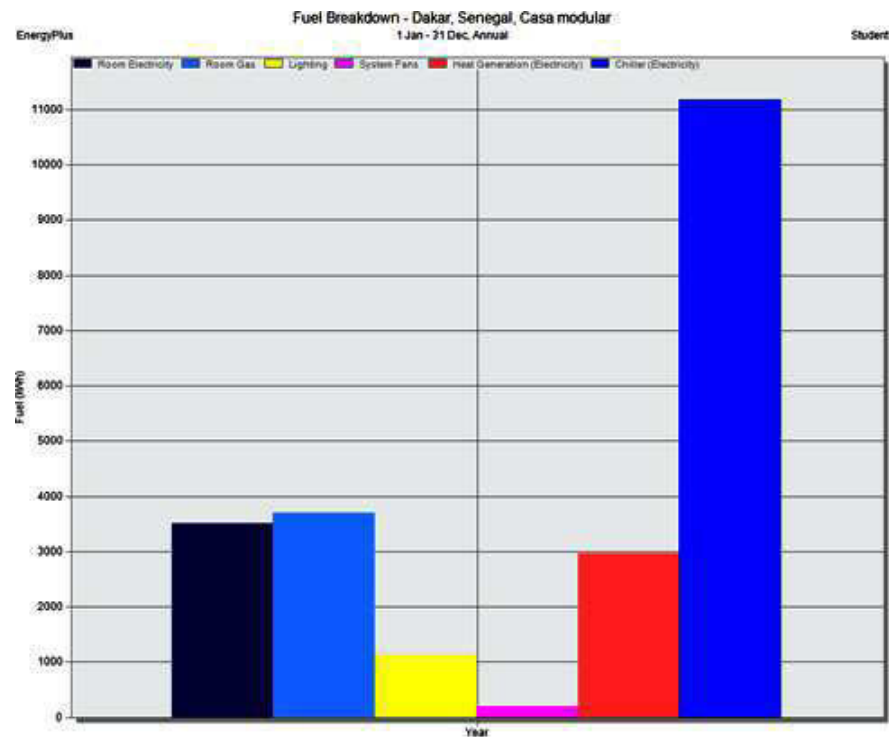


Figura 42 - Consumos energéticos anuais desagregados na casa otimizada com climatização mecânica.

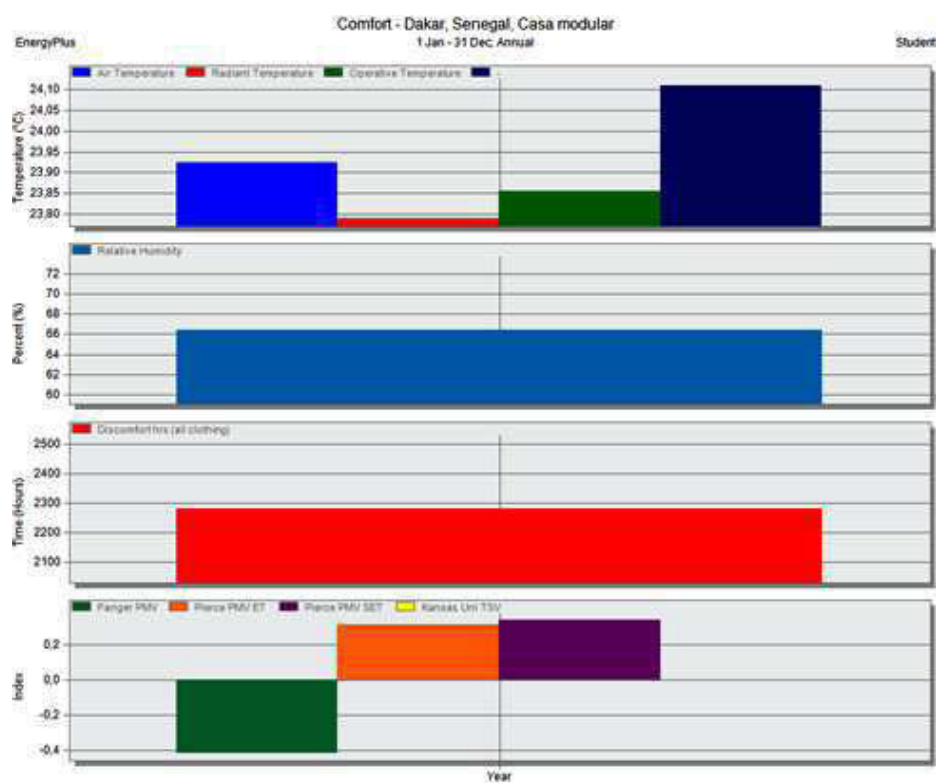


Figura 43 - Gráficos das médias anuais de temperatura, humidade relativa e índices de conforto do interior da casa otimizada climatizada com ar condicionado.

Considerando a casa otimizada substituindo a parede 1 M182/Q27 pela 5, que é uma solução de paredes exteriores com inércia forte, verifica-se que a climatização é muito mais eficiente, uma vez que se obtêm índices de PMV mais ajustados (Tabela 18), e com consumos energéticos muito mais reduzidos (Figuras 44 e 45). O consumo total anual estimado é 11.755,76 kWh, muito inferior ao da solução proposta (18.962,88 kWh) e da casa referência (21.298,79 kWh).

Tabela 18 - Médias mensais de temperatura ambiente no exterior, da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de *Fanger* no interior da casa otimizada com parede 5, com climatização.

Data	T. A. °C	Quarto Oeste				Quarto Leste				Sala/ Cozinha				WC			
		T.Op. °C	HR	PMV		T.Op. °C	HR	PMV		T.Op. °C	HR	PMV		T.Op. °C	HR	PMV	
01-01-2002	20,2	23,6	51,8	-0,7		23,5	51,5	-0,7		24,5	49,1	0,4		22,9	55,4	0,0	
01-02-2002	20,3	23,5	57,5	-0,6		23,5	57,3	-0,6		24,3	55,5	0,4		22,7	62,9	0,0	
01-03-2002	20,8	23,6	64,9	-0,5		23,6	64,8	-0,5		24,7	60,7	0,5		23,3	68,2	0,2	
01-04-2002	21,2	23,6	69,3	-1,1		23,6	69,2	-1,1		24,8	64,7	-0,2		23,5	72,2	-0,7	
01-05-2002	23,0	24,3	76,0	-0,8		24,2	76,2	-0,8		25,5	68,1	0,0		24,7	75,2	-0,3	
01-06-2002	25,1	25,4	76,1	-0,3		25,3	76,4	-0,4		25,8	69,1	0,1		25,4	75,0	0,0	
01-07-2002	27,0	26,3	72,0	0,0		26,1	71,7	0,0		25,9	66,7	0,1		25,7	70,6	0,1	
01-08-2002	27,3	26,0	77,2	0,0		25,9	77,5	-0,1		25,8	70,9	0,1		25,4	74,8	0,0	
01-09-2002	27,7	26,4	73,3	0,1		26,3	74,3	0,1		25,9	68,9	0,1		25,7	72,4	0,1	
01-10-2002	27,5	26,1	74,8	0,4		26,0	75,8	0,4		25,8	70,1	0,9		25,5	74,3	0,9	
01-11-2002	25,9	25,6	71,8	0,2		25,5	73,2	0,2		25,9	66,1	0,9		25,6	72,2	0,9	
01-12-2002	23,1	24,0	64,6	-0,4		24,0	64,6	-0,4		25,3	59,2	0,7		24,3	65,0	0,4	

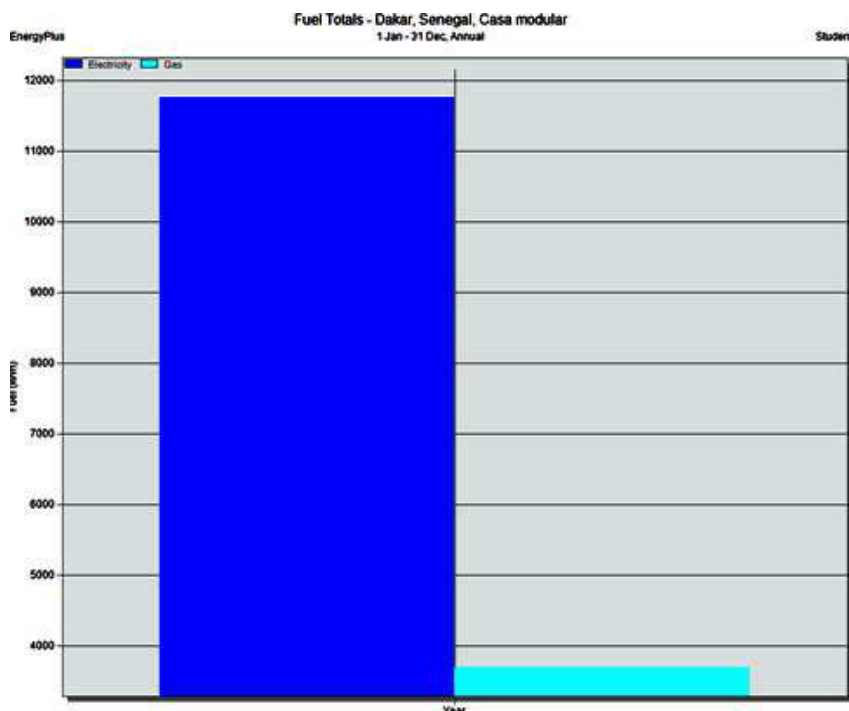


Figura 44 - Consumos energéticos anuais totais na casa otimizada com parede 5, com climatização mecânica.

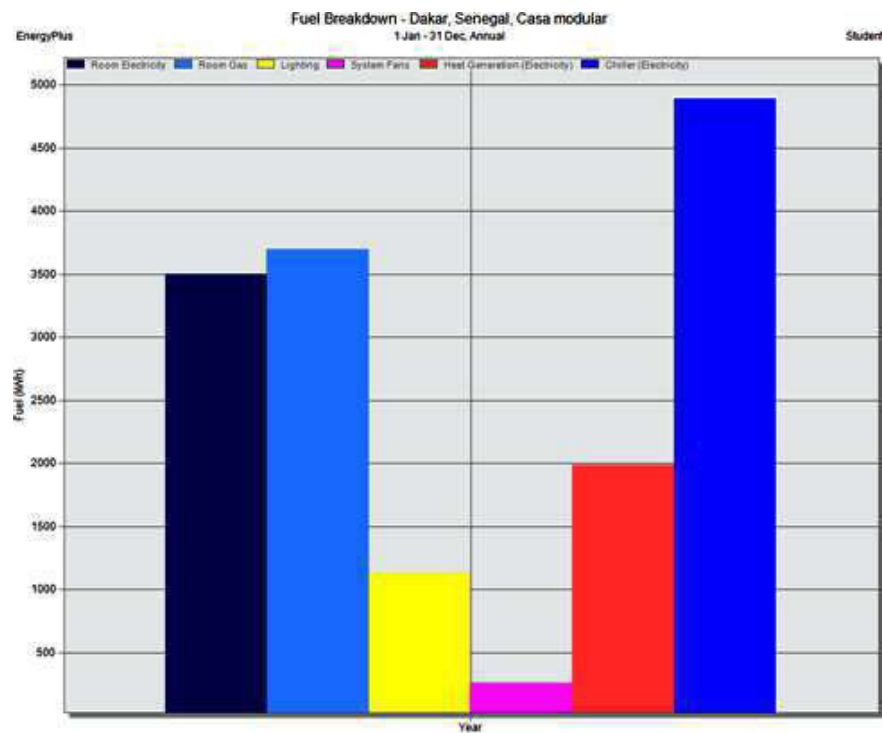


Figura 45 - Consumos energéticos anuais desagregados na casa otimizada com parede 5, com climatização mecânica.

Por último é avaliada a climatização da casa apenas com a ventilação natural, verificando-se pelos resultados das médias mensais que as temperaturas operativas diminuem e que, consequentemente, os índices PMV de *Fanger* melhoraram bastante comparativamente com a primeira solução apresentada sem ventilação natural.

Tabela 19 - Médias mensais de temperatura ambiente de bolbo seco no exterior e da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de *Fanger* no interior da casa otimizada com ventilação natural.

Data	Quarto Oeste				Quarto Leste			Sala/ Cozinha			WC		
	T. A. °C	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV
01-01-2002	20,2	21,5	60,0	-1,4	21,2	60,6	-1,4	23,5	52,4	0,1	22,0	58,0	-0,2
01-02-2002	20,3	21,3	68,2	-1,4	21,1	68,6	-1,4	23,1	60,4	0,1	21,8	66,4	-0,2
01-03-2002	20,8	22,1	73,4	-1,0	21,9	74,1	-1,1	24,0	64,8	0,4	22,6	71,1	0,0
01-04-2002	21,2	22,5	77,4	-1,5	22,3	78,1	-1,6	24,4	68,5	-0,4	23,1	75,0	-0,8
01-05-2002	23,0	24,2	80,0	-0,8	24,0	80,7	-0,9	25,7	71,9	0,1	24,7	77,5	-0,2
01-06-2002	25,1	25,6	81,3	-0,2	25,4	81,9	-0,2	26,9	74,1	0,6	25,9	79,3	0,2
01-07-2002	27,0	26,8	79,2	0,3	26,7	79,9	0,3	28,2	72,4	1,1	27,1	77,6	0,7
01-08-2002	27,3	27,0	85,6	0,5	26,9	86,2	0,4	28,4	78,5	1,2	27,4	83,9	0,9
01-09-2002	27,7	27,2	82,6	0,5	27,1	83,2	0,5	28,7	75,3	1,3	27,6	81,0	0,9
01-10-2002	27,5	27,1	80,4	0,9	27,0	81,1	0,8	28,3	74,6	1,7	27,3	79,6	1,4
01-11-2002	25,9	26,2	75,2	0,5	26,0	76,1	0,4	27,3	69,2	1,3	26,3	74,2	1,1
01-12-2002	23,1	23,8	67,5	-0,5	23,6	68,1	-0,5	25,4	60,7	0,7	24,2	65,8	0,4

A casa apresentada como alternativa à casa referência, climatizada apenas com ventilação natural, permite alcançar índices de conforto térmico razoáveis ao longo do ano, principalmente nos quartos principalmente durante o Verão. No entanto, nesta estação a casa ainda está quente na sala, onde as temperaturas ultrapassam os 28°C. Há que ter em conta que o método de *Fanger* não é o mais adequado para avaliar o conforto de uma casa naturalmente ventilada em condições passivas, sendo os modelos adaptativos os mais indicados.

Numa fase seguinte é avaliada a climatização da casa otimizada através do *mixed mode* que consiste na combinação da ventilação natural e dos sistemas mecânicos. Este sistema integra o uso do ar condicionado quando e onde for necessário, com o uso da ventilação natural sempre que é viável, para maximizar o conforto, evitando o uso significativo de energia e os custos operacionais de ar condicionado durante todo o ano ^[100]. Os sistemas de aquecimento e arrefecimento são dimensionados manualmente, sendo a ventilação natural desativada para dimensionar os equipamentos de aquecimento e a ventilação mecânica para dimensionar os equipamentos de arrefecimento ^[100].

Tabela 20 - Médias mensais de temperatura ambiente de bolbo seco no exterior e da humidade relativa, temperatura operativa e índice PMV de *Fanger* no interior da casa otimizada climatizada em *mixed mode*.

		Quarto Oeste				Quarto Leste				Sala/ Cozinha			WC		
Data	T. A. °C	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV	T.Op. °C	HR	PMV		
01-01-2002	20,2	23,4	52,2	-0,7	23,3	52,1	-0,7	24,4	49,5	0,4	22,9	55,5	0,0		
01-02-2002	20,3	23,4	57,9	-0,7	23,4	57,7	-0,7	24,2	55,7	0,4	22,6	62,9	0,0		
01-03-2002	20,8	23,6	65,0	-0,5	23,6	64,8	-0,6	24,7	60,9	0,5	23,3	68,1	0,2		
01-04-2002	21,2	23,7	70,0	-1,1	23,6	69,5	-1,1	24,8	65,0	-0,2	23,5	72,3	-0,7		
01-05-2002	23,0	24,3	76,7	-0,8	24,2	76,6	-0,8	25,5	68,5	0,0	24,7	75,4	-0,3		
01-06-2002	25,1	25,3	76,8	-0,3	25,2	77,0	-0,4	25,8	69,6	0,1	25,4	75,7	0,0		
01-07-2002	27,0	26,2	72,9	0,0	26,1	72,9	0,0	25,9	67,5	0,1	25,8	71,8	0,1		
01-08-2002	27,3	26,2	78,7	0,0	26,1	79,2	0,0	25,6	72,3	0,1	25,6	76,5	0,1		
01-09-2002	27,7	26,3	74,5	0,1	26,3	75,6	0,1	25,8	69,8	0,1	25,8	73,9	0,1		
01-10-2002	27,5	26,2	75,8	0,5	26,1	76,9	0,5	25,7	71,1	0,9	25,6	75,5	0,9		
01-11-2002	25,9	25,5	72,5	0,2	25,4	73,9	0,2	25,9	66,6	0,9	25,6	72,9	0,9		
01-12-2002	23,1	24,0	65,3	-0,4	23,9	65,0	-0,4	25,3	59,5	0,7	24,2	65,2	0,4		

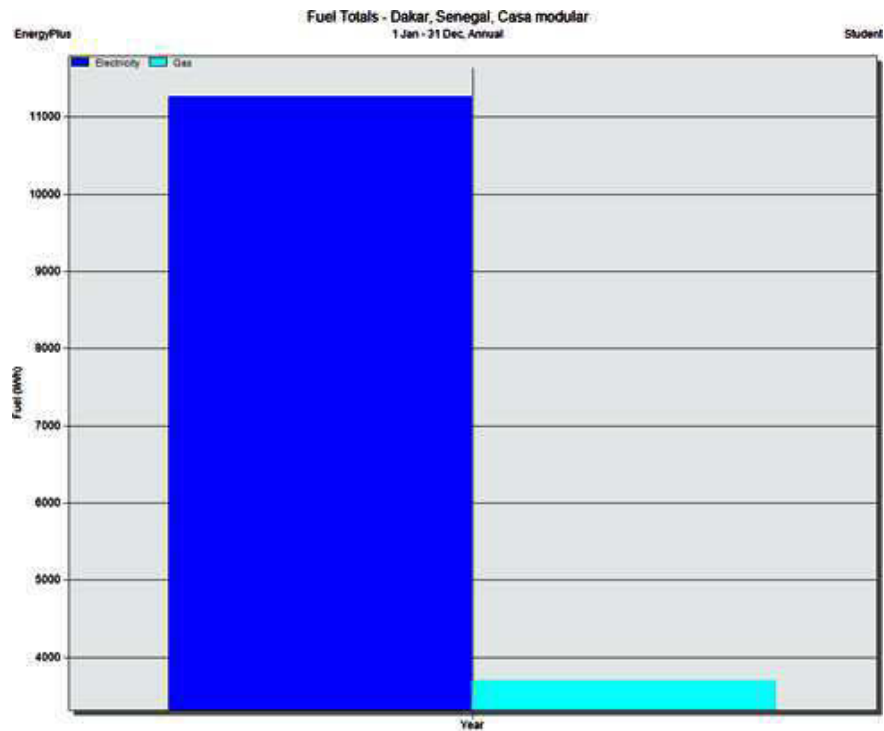


Figura 46 - Consumos energéticos anuais totais na casa otimizada climatizada por *mixed mode*.

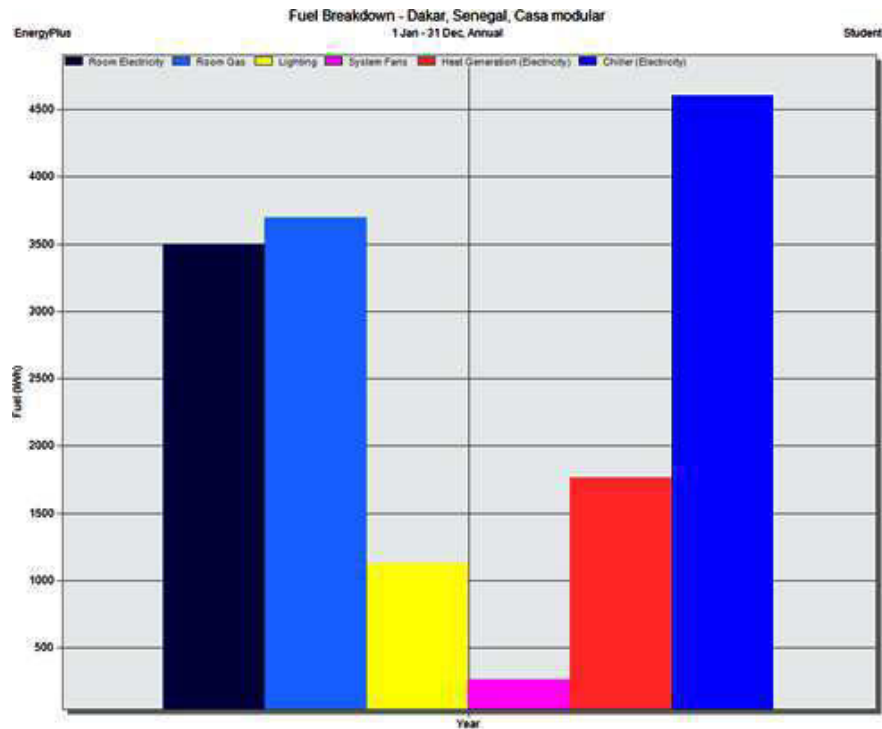


Figura 47 - Consumos energéticos anuais desagregados na casa otimizada climatizada por *mixed mode*.

Os consumos energéticos são substancialmente reduzidos, passando de 18.962,88 kWh quando climatizada apenas por equipamentos mecânicos para 11.254 kWh quando climatizada por um sistema híbrido de ventilação natural conjugada com ar condicionado.

4.6.4.4 Discussão da solução proposta

A solução proposta para otimizar a casa referência implica a substituição de quase todos os elementos construtivos do primeiro modelo, mantendo-se os materiais das paredes internas e das portas. As paredes exteriores leves com revestimento metálico, poliestireno extrudido e gesso, são substituídas por paredes com inércia mais elevada, integrando BioPCMs e reboco leve reforçado, e a cobertura plana que era revestida por asfalto passa também a integrar materiais de mudança de fase. Os envidraçados passam a ter caixilharias com corte térmico, o vidro é substituído por Dbl Ref-A-L Clr 6mm/6mm Air, com caixilharia em alumínio e com corte térmico e a percentagem de envidraçado em relação às paredes diminui de 30 para 20%, e só não se reduz mais para não limitar a casa ao nível da iluminação natural. Na prática as janelas devem ser protegidas com redes mosquiteiras que impedem a entrada de insetos dentro da casa protegendo

também da entrada da água da chuva durante o Verão, período em que os envidraçados permanecem mais tempo abertos para fomentar a ventilação natural.

A conjugação de todos os elementos construtivos que nos testes paramétricos originaram os menores consumos energéticos totais (inclui aquecimento e arrefecimento da casa), permite projetar uma casa que idealmente deve ser complementada com um sistema de climatização mecânica, mas que em condições passivas, ou seja, se for climatizada apenas por meio de ventilação natural, permite alcançar níveis de conforto quase sempre aceitáveis nos quartos, com exceção dos meses de Inverno quando estes espaços podem ficar ligeiramente frescos. Os índices de *Fanger* mais desajustados registam-se na sala durante o Verão, quando as temperaturas ultrapassam os 28°C, tornando-se quente.

Importa realçar, conforme já havia sido explicado no capítulo 3, que o modelo de conforto térmico definido por *Fanger*, considera que os indivíduos têm uma reação passiva ao estímulo térmico e não considera a possível que um indivíduo perante uma situação de desconforto, possa restabelecer o conforto, (por exemplo vestindo um casaco se estiver com frio). Assim, muito provavelmente obter-se-iam resultados melhores se o conforto térmico fosse avaliado através de modelos adaptativos, que alguns defendem serem os mais adequados para avaliar uma casa passiva, naturalmente ventilada.

O método de climatização avaliado que permite alcançar melhores níveis de conforto e de eficiência energética é o *mixed mode*.

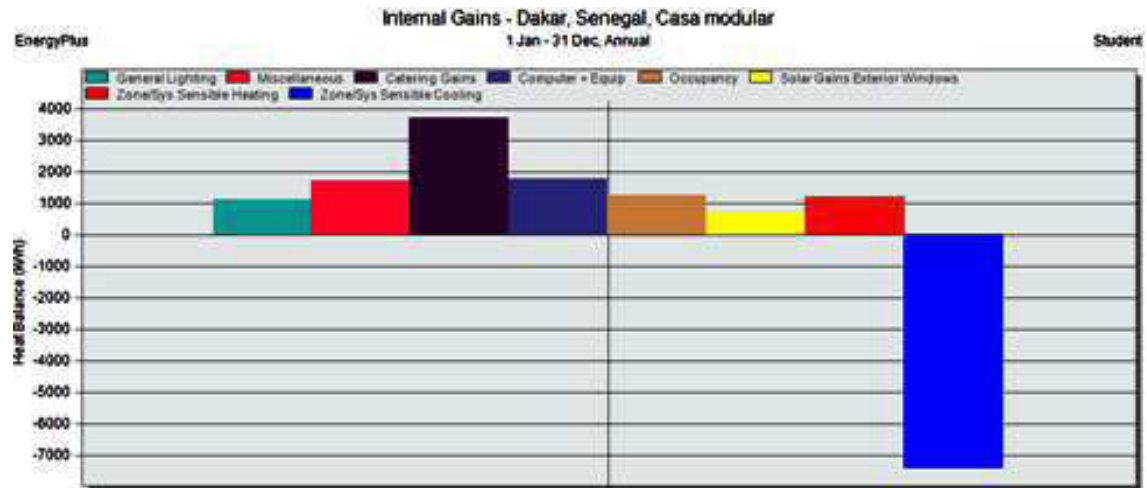


Figura 48– Balanço térmico na casa otimizada climatizada, devido aos ganhos internos por equipamentos, iluminação, ocupação e ganhos solares através dos envidraçados, e arrefecimento/aquecimento sensíveis.

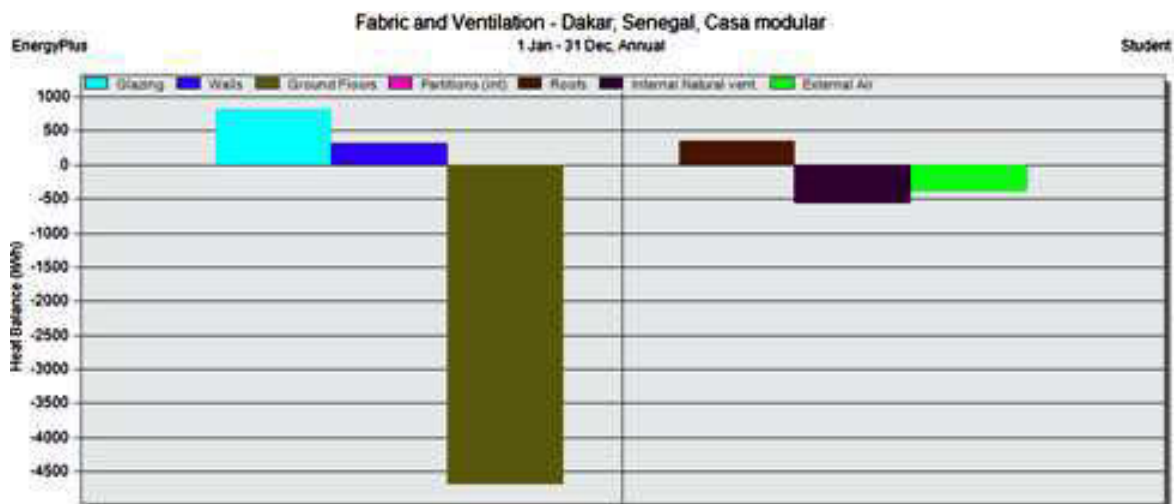


Figura 49 – Balanço térmico devido aos fluxos de calor através dos elementos construtivos e ventilação.

As figuras 48 e 49 mostram a influência no balanço térmico dos ganhos internos devido à ocupação, equipamentos instalados, iluminação e das componentes do envelope da casa e da ventilação, ao longo dum ano, permitindo concluir que os ganhos térmicos provêm essencialmente dos ganhos internos.

A substituição da cobertura referência pela cobertura 1 com PCMs, e que tem inércia média e baixa condutividade, restringe substancialmente os ganhos térmicos através da superfície horizontal, contribuindo para a diminuição do consumo energético para arrefecimento. A substituição do tipo de vidro também restringe os ganhos solares no Verão contribuindo também para a melhoria da eficiência energética.

As paredes exteriores da casa otimizada também têm inércia superior às anteriores e a sua condutividade é muito inferior (passa de 0,35 para 0,187 W/m²-K), o que contribui para diminuir a dissipação de calor pelo que o balanço térmico nas paredes exteriores passa a ser positivo. Também se registam perdas de calor por condução acentuadas, através do pavimento.

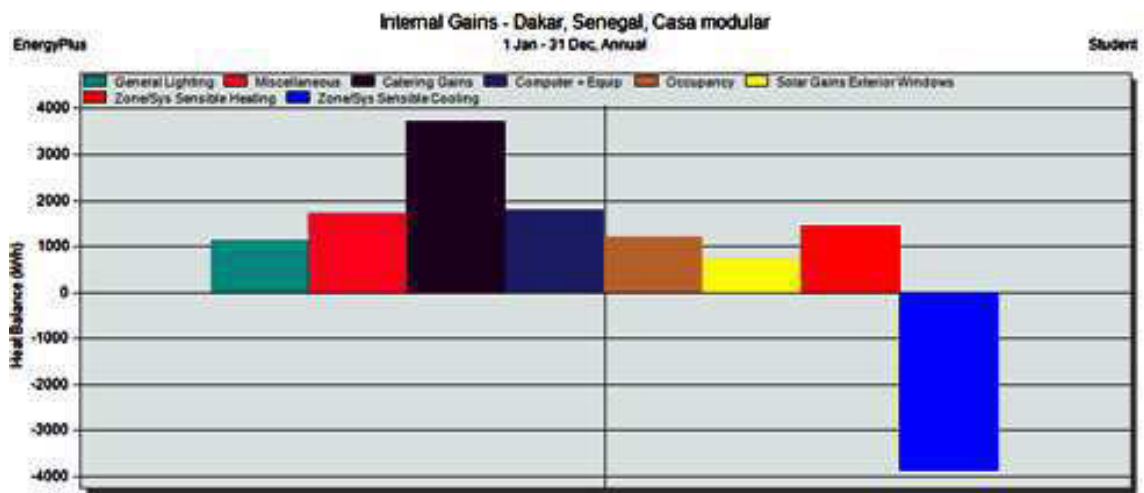


Figura 50– Balanço térmico na casa climatizada otimizada com parede 5, devido aos ganhos internos por equipamentos, iluminação, ocupação e ganhos solares através dos envidraçados, e arrefecimento/aquecimento sensíveis.

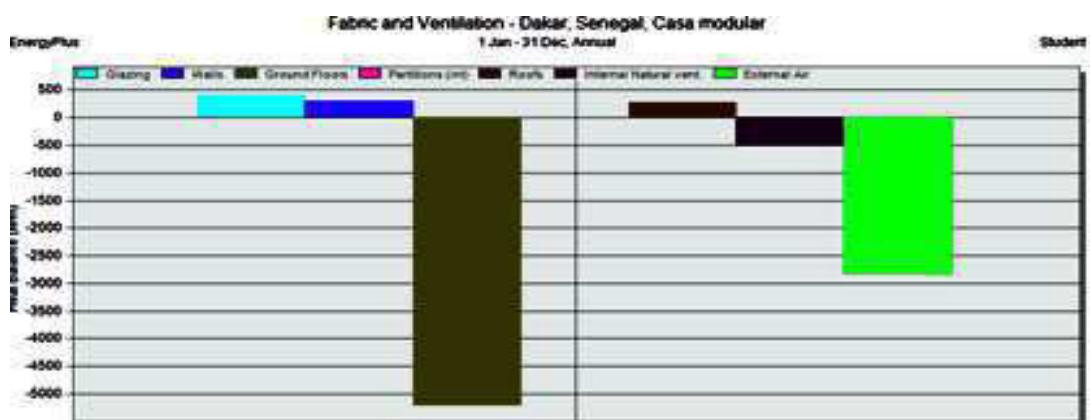


Figura 51 – Balanço térmico devido aos fluxos de calor através dos elementos construtivos e ventilação.

As figuras 50 e 51 apresentam os gráficos do balanço térmico da casa com paredes exteriores com inércia forte ($M_{si} = 2247,56 \text{ Kg/m}^2$). Elementos com estas características têm grande capacidade para armazenar o calor durante períodos longos: no Verão, armazenam o calor diurno que provém dos picos de temperatura, que depois é libertado para o meio interior durante a noite, permitindo um ambiente mais fresco e confortável durante o dia. Este facto é demonstrado com a redução significativa dos consumos energéticos para o arrefecimento dos espaços. Durante a noite, a ventilação natural contribui para retirar parte deste calor libertado e arrefecer a estrutura (visível na barra verde do gráfico da fig.49). No Inverno, a libertação deste calor para o meio interno contribui para a redução das necessidades de aquecimento do edifício e criação de um ambiente confortável.

Verifica-se que as soluções construtivas de paredes exteriores com inércia forte são as que apresentam consumos energéticos para climatização mais reduzidos, e que as reduções nos consumos para arrefecimento são muito maiores, estimando-se uma redução de cerca de 65%. Os consumos com o aquecimento não variam muito com a inércia, embora se verifique que à inércia alta também correspondem os valores mais baixos cerca de 13% mais baixo relativamente à casa referência.

4.7 Resumo e conclusões do capítulo

O trabalho desenvolvido no presente capítulo permite aferir os pressupostos assumidos no capítulo anterior.

Confirma-se a influência das características inerciais dos elementos construtivos no desempenho térmico e energético do edifício concluindo-se que a inércia forte contribui para reduzir consideravelmente os consumos energéticos, principalmente com o arrefecimento.

São também evidentes as dificuldades em projetar uma casa passiva num clima em que o Verão coincide com a estação das chuvas, dificultando a conciliação da temperatura e da humidade relativa dentro de intervalos aceitáveis, sem o recurso a técnicas de climatização mecânica

eficazes, que, ao incluir o controlo de humidade, implicam consumos energéticos mais significativos.

A eficácia dos materiais de mudança de fase integrados na cobertura e nas paredes exteriores também é demonstrada neste capítulo, uma vez que os elementos construtivos com inércia média, associados ao melhor desempenho térmico e energético incluem BioPCMs aplicados pelo interior sendo os BioPCMs M182/Q 27 (com maior espessura e ponto de fusão igual a 27°C) os mais eficientes comparativamente com os restantes avaliados e que se encontram disponíveis no DB. A aplicação de PCMs consiste assim numa estratégia passiva eficaz para a otimização do comportamento térmico da casa modular em estudo.

Também é avaliada a importância de proteger a cobertura contra a radiação solar excessiva, que é transmitida por radiação durante o fluxo descendente, contribuindo bastante para o aumento das temperaturas dentro da casa, durante o Verão. São experimentadas coberturas com proteções térmicas refletantes (cobertura 3 que corresponde ao telhado evapo-reflexivo apresentado no capítulo anterior). A solução mais eficaz é a que inclui PCMs e isolamento que também é muito importante para proteger a casa da radiação excessiva característica das regiões próximas do Equador.

O efeito do isolamento também é avaliado nas paredes verticais verificando-se que as paredes de água, que são a única solução sem isolamento testada, estão associadas a consumos de energia muito mais elevados com a climatização do que as restantes soluções.

Neste capítulo também é avaliada a influência do tipo de vidro no conforto térmico, verificando-se que a penetração da radiação solar no interior da casa através dos vidros é muito maior na casa de referência do que na solução otimizada, porque no primeiro caso o vidro aplicado é simples, claro de 6mm e no segundo é refletivo com revestimento de transmitância baixa em aço inoxidável REF-A-L. No primeiro caso o coeficiente de transmissão térmica (fator U), a transmissão solar total (fator g), e transmissão luminosa (fator TV) são superiores. Um estudo realizado em Chennai, na Índia^[52], perto do Equador (13° 00'N, 80° 11'E), sobre a aplicação de vários tipos de janelas, conclui que o vidro mais adequado é muito semelhante nas suas propriedades ao REF-A-L.

O conforto no interior da casa é bastante favorecido pela fomentação da ventilação natural na casa, registrando-se melhorias significativas nos índices de conforto tanto na casa de referência como na solução otimizada, aproximando o modelo construtivo a uma casa passiva, como se pretende. No entanto, os melhores resultados são alcançados se a ventilação natural for conjugada com climatização mecânica, através de *mixed mode*.

5. Conclusões e trabalho futuro

5.1 Conclusões

O objetivo do presente trabalho é avaliar se seria possível garantir as condições de conforto numa pequena casa modular para ocupação humana permanente, através da aplicação de sistemas passivos complementados com sistemas mecânicos, sempre que necessário, considerando que o edifício estará tanto mais adaptado ao clima onde se encontra quanto mais reduzido for o consumo de energia necessário para conseguir condições de conforto térmico.

Um das conclusões retiradas do estudo desenvolvido é que a casas pré fabricadas modulares têm evoluído de forma a corresponder aos princípios de sustentabilidade e que os aspetos ambientais não foram menosprezados desde que o arquiteto *Buckminster Fuller*, criou as primeiras casas baseadas em princípios de *ecodesign*.

A construção modular fabricada de acordo com os princípios de sustentabilidade permite mitigar os impactes ambientais e o consumo de recursos naturais, constituindo um exemplo de ecoeficiência aplicada à construção. Além disso permite alcançar economias de escala mediante uma maior aceitação deste tipo de construção.

Relativamente aos parâmetros mais relevantes que devem influenciar as soluções construtivas, num clima tropical, conclui-se que:

O fator forma de um edifício deve ser reduzido e a compactidade elevada, sendo que este parâmetro tem maior influência em construções localizadas em regiões mais frias onde predominam as necessidades de aquecimento.

Em climas tropicais é necessário restringir os raios solares, logo a orientação dos edifícios depende da trajetória do Sol ao longo do ano e da radiação solar.

A densidade, resistência térmica, calor específico, propriedades radiativas e ainda espessura e cor são propriedades muito importantes a ter em conta nos materiais a utilizar na construção das envolventes opaca e envidraçada de um edifício. No entanto, não é fácil aliar as melhores soluções construtivas aos materiais mais económicos, pois as soluções que à partida são mais eficientes estão associadas a tecnologias de ponta, de que são exemplo os PCMs ou as janelas com vidro duplo reflexivo de baixa emissividade.

As paredes de *Trombe* são mais indicadas para construções onde as necessidades de aquecimento prevalecem, pois este sistema solar passivo é indutor de ganhos de calor indesejados e fenómenos de sobreaquecimento, durante os períodos quentes.

No Equador onde a radiação solar é mais intensa, as coberturas devem estar protegidas do sol com isolantes térmicos refletivos ou barreiras radiantes, sendo as coberturas ajardinadas uma alternativa mais ecológica e eficaz pois estas além de restringirem os ganhos solares, retêm parte das águas pluviais incidentes e também atuam como filtro destas águas que podem ser reaproveitadas

As técnicas de ventilação são utilizadas para melhorar a qualidade do ar interior e as condições de conforto dos edifícios. As técnicas de arrefecimento passivo estão quase sempre associadas a sistemas de ventilação que permitem a entrada de ar fresco nas casas e o arrefecimento fisiológico dos ocupantes. A conjugação de tecnologias de arrefecimento passivo com meios ativos alimentados por fontes renováveis como o sistema solar fotovoltaico pode ser uma solução para obter o conforto térmico desejado e o *free cooling* ou arrefecimento livre com PCMs consiste numa das formas de ventilação passiva emergente, com resultados satisfatórios permitindo reduzir o tamanho do sistema de ventilação mecânica numa casa.

Em climas tropicais, a falta de água durante a estação seca, justifica o seu armazenamento durante a estação das chuvas e um sistema de recolha de água pluvial está quase sempre associado à utilização de uma bomba hidráulica, podendo ser alimentado por um sistema fotovoltaico. Por este motivo e também devido às ótimas condições solares, as soluções renováveis de solar térmico e fotovoltaico, constituem uma mais-valia para a construção modular sustentável no clima em estudo.

As soluções construtivas com inércia alta são as que proporcionam melhor conforto térmico e melhor desempenho energético, mas não são compatíveis com o tipo de construção modular que, pelas suas características, implica a utilização de materiais leves e portanto com inércia baixa. Assim, a melhor solução obtida neste estudo consiste num modelo com inércia média.

A otimização da inércia no modelo em estudo foi conseguida através da utilização de materiais de mudança de fase nos seus elementos construtivos, sendo os BioPCMs M182/Q 27 (com maior espessura e ponto de fusão igual a 27°C) utilizados na cobertura e paredes exteriores (aplicados pelo interior), os mais eficazes de todos os experimentados.

Relativamente à envolvente envidraçada conclui-se que a radiação solar no interior da casa através dos vidros é bastante minimizada quando se aplica vidro é refletivo com revestimento de transmitância baixa em aço inoxidável REF-A-L em vez de vidro simples claro com 6mm.

No desenvolvimento do caso de estudo foram evidentes as dificuldades em projetar uma casa passiva num clima em que o Verão coincide com a estação das chuvas, dificultando a conciliação da temperatura e da humidade relativa dentro de intervalos aceitáveis, sem o recurso a técnicas de climatização mecânica eficazes, que, ao incluir o controlo de humidade, implicam consumos energéticos mais significativo. No entanto, conseguiu-se obter um modelo que atinge condições de conforto térmico se for climatizada com ventilação natural complementada com equipamentos mecânicos ou seja, ventilação em *mixed mode*, requerendo para o efeito uma utilização manual adequada da fenestração e dos equipamentos, por parte dos ocupantes.

5.2 Trabalho futuro

A obtenção de níveis de humidade relativa e de valores de temperatura razoáveis é demasiado dispendiosa em climas quentes e húmidos, como se pode concluir pelos consumos energéticos anuais estimados para as diversas situações avaliadas. Para trabalhos futuros relacionados com a otimização do comportamento térmico e energético das casas modelares em climas tropicais húmidos, propõe-se a pesquisa de elementos construtivos que possam integrar materiais dissecantes, como o gel de sílica, cloreto de lítio ou outros capazes de absorver a humidade. Os desumidificadores dissecantes e outros equipamentos de climatização que integrem

desumidificação por um processo de absorção ou adsorção podem ser alvo de estudos de otimização de eficiência energética.

Tratando-se de construção modular considera-se ainda interessante estudar em trabalhos futuros a influência no desempenho térmico de eventuais módulos que possam ser acrescentados para ampliação da casa, de forma a determinar a disposição mais adequada. Seria ainda importante a realização da avaliação financeira das soluções propostas neste trabalho assim como a avaliação do ciclo de vida e respetivo impacte ambiental dos materiais aplicados nessas soluções.

6. Referências

- [1] <http://unstats.un.org/unsd/demographic/products/dyb/dyb2.htm>, consultado em 5-09-2012;
- [2] http://www.hrea.org/index.php?doc_id=412, consultado em 6-09-2012;
- [3] Cobbers, Oliver Jahn, Peter Gossel, “Prefab Houses”, Taschen, 2011;
- [4] Tiago Alexandre Valente Nunes, As Casas para os Trópicos em *Niamey* e *Brazzaville* – habitação pré-fabricada de *Jean Prouvé*, Departamento de arquitetura da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2010;
- [5] Colin Davis, “Prefabricated Home”, Reaktionbooks Lda, 2005;
- [6] <http://casasprefab.blogspot.pt/>, consultado em 1-10-2012;
- [7] http://pt.wikipedia.org/wiki/Buckminster_Fuller, consultado em 3-10-2012;
- [8] Ferreira, José Francisco Ferreira, “House in a box- um estudo sobre o pré-fabricado na arquitetura”, dissertação de mestrado integrado em Arquitetura, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2011;
- [9] Revista Casas de Madeira, nº 15, Tuttirév, 2011;
- [10] “40% Whole-House Energy Savings in the Hot-Humid Climate”, Vol.15, Building Technologies Program 2011, US Department of energy, Pacific Northwest National Laboratory & Oak Ridge National Laboratory, 2011;
- [11] “A descrição longa do *passive – on*”. Passive-on Project, European Comission under the intelligent energy – Europe programme, 2007;
- [12] WWW.ashrae.org; Silva, 2006, consultado em 13-11-2012;

- [13] M A Humphreys & J F Nicol, The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day life, *Energy and Buildings* 34, 667-684, 2002;
- [14] Fanger, P. O.; Toftum, J. extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates, *Energy and buildings*, v. 34, p. 533-536, 2002;
- [15] M A Humphreys & J F Nicol, The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day life, *Energy and Buildings* 34, 667-684, 2002;
- [16] Brager, G.S.; Dear, R.J. de. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings*, V. 27, p. 83-96. 1998;
- [17] MA Humphreys & JF Nicol, Do people like to feel "Neutral"? Response to the ASHRAE scale of subjective warmth in relation to thermal preference, indoor and outdoor temperature. *ASHRAE Transactions*, 110 (2), p.569-577, 2004;
- [18] http://www.wmo.int/pages/themes/climate/understanding_climate.php, consultado em 25-11-2012;
- [19] Yun Lin, João; Como arrefecer o planeta, Editorial Presença, p.138,2008;
- [20] http://pt.wikipedia.org/wiki/Classifica%C3%A7%C3%A3o_clim%C3%A1tica_de_K%C3%B6ppen-Geiger, consultado em 25-11-2012;
- [21] Francisco Manuel Gomes Ferraz Esteves, “Construção em climas tropicais Comportamento Térmico de Edifícios em Luanda”, Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, 2009;
- [22] <http://www.wordtravels.com/Travelguide/Countries/Senegal/Climate#ixzz2DH3cMYdY>, consultado em 25-11-2012;
- [23] Andris Auliciems and Steven V. Szokolay, Thermal Comfort - Passive and Low Energy Architecture International – Design tools and techniques; Passive and Low Energy Architecture International in association with the University of Queensland Dept. of architecture;

[24] Chen, Q.Y Using computational tools to factor wind into architectural environment design. *Energy and Buildings*, v. 36, 1197-1209, 2004;

[25] http://pt.wikipedia.org/wiki/Arquitetura_bioclim%C3%A1tica, consultado em 06-12-2012;

[26] Gonçalves, H.; Graça, J. Mariz; *Conceitos bioclimáticos param os edifícios em Portugal*; Lisboa: DGGE/IP-3E, 1998;

[27] Johann Van Lengen, “Manual do Arquiteto Descalço”, Livraria do arquiteto, 2004;

[28] Gomes, R.J., *O problema do conforto térmico em climas tropicais e subtropicais*. LNEC, Lisboa, 1967;

[29] Eficiência energética em edifícios- Transformar o mercado; World Business Council for Sustainable Development;

[30] F. Pacheco Torgal, Said Jalali, “Construção Sustentável: O caso dos materiais de construção”, congresso construção 2007,- 3º Congresso Nacional, Universidade de Coimbra, 2007;

[31] http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.cfm#IWEC, consultado em 04-12-2012;

[32] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Eco-design>, consultado em 25-10-2012;

[33] Decreto-Lei nº 80/2006, de 4 de Abril, aprovou o Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios, Diário da República nº 67 - I – Série –A;

[34] M.C. Singh*, S.N. Garg, “Energy rating of different glazings for Indian climates”, *Energy* 34 1986–1992, 2009;

[35] Vesna Zegarac Leskovar, Miroslav Premrov, “*Influence of glazing size on energy efficiency of timber-frame buildings*”, *Construction and Building Materials* 30, 92–99, 2012;

[36] <http://lisboaenova.org/pt/podcasts/fausto-simoes/a-importancia-do-factor-forma-nos-edificios-pe-19032009>, consultado em 27-12-2012;

[37] Basam Behsh, Energy consumption characteristics of high-rise apartment buildings according to building shape and mixed-use development, Building Physics, 6th Nordic Symposium 2002;

[38] Hendrichs, D.U., Daniels, Pluminus 20⁰/40⁰ latitude – Sustainable building design in tropical and subtropical regions. Axel Menger, Londres, 2007;

[39] Frota, Anésia Barros; Schiffer, Sueli Ramos; “Manual de conforto térmico”; 7^a edição, Studio Nobel;

[40] Koenigsberger, O. H., Ingersoll, T. G., Mayhew, A., Szokolay, S.V., *Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales*. Paraninfo, Madrid, 1977;

[41] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Dakar>, consultado em 04-01-2013;

[42] Aelenei, Laura, “Envolvente na eficiência energética dos edifícios”, LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P.2011;

[43] Oakley, D. (1961), “Tropical Houses – A guide to their design, B.T. Batsford LTD, Londres;

[44] <http://www.engenhariacivil.com/inercia-termica-edificios>, consultado em 11-01-2013;

[45] Canha da Piedade, et al - *Térmica de Edifícios*, (1^a edição), Edições Orion, 2009;

[46] Wagas, Adeel and Zia Ud Din, Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review Article, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 18, 607-625, 2013;

[47] Coutinho, João Araújo Pereira, materiais de mudança de fase, para isolamento térmico e armazenamento de energia, Departamento de Química da Universidade de Aveiro, CICECO, <http://path.web.ua.pt/file/coluna-eq2%20v2.pdf>;

[48] http://www.micronal.de/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1_290798, consultado em 21-01-2013;

[49] Sharma, Atul et al, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 318–345, 2009;

[50] Mendonça, Paulo; Habitar sob uma segunda pele : estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados, tese de Doutoramento em engenharia civil, Universidade do Minho, capítulo V, págs. 5-7, capítulo IX, 2005;

[51] Gomes, Miguel António da Graça; Construção Sustentável-Contributo da utilização da parede Trombe; Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção, Prof. Doutor Miguel Pires Amado, 2011;

[52] Elzaidab, Abdalla. A. M; Low Energy, Wind Catcher Assisted Indirect – Evaporative Cooling System for Building Applications; Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy September, 2008;

[53] Rebelo, Alberto Gomes Parente Madureira, “Optimização e dimensionamento de vãos envidraçados”, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2009;

[54] Schittich, Christian; “Building Skins – Concepts, Layers, Materials”; Birkhäuser; Edition Detail; München, 2001;

[55] Matias, L., Avaliação do Desempenho Térmico de Proteções Refletantes aplicadas em Coberturas Inclinadas. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2011;

[56] Kunajitpimol, Chayakorn, “Passive Housing Design in a Tropical Climate”, Department of Mechanical Engineering, University Strathclyde, 2009;

- [57] Desjarlais, A.; Tye, R. Research and Development Data to Define the Thermal Performance of Reflective Materials used to Conserve Energy in Building Applications, U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service (NTIS), Springfield, 1990;
- [58] Cavalcanti, M., Análise da Influência de Superfícies Reflexivas nas Perdas de Calor de Sistemas Térmicos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, 2011;
- [59] RIMA (Reflective Insulation Manufacturers Association), Reflective Insulation, Radiant Barriers and Radiation Control, 2002; disponível em <http://www.rimainternational.org/org/pdf/handbook.pdf>, consultado em 08-02-2013;
- [60] Michels, C., Análise da Transferência de Calor em Coberturas com Barreiras Radiantes, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2007;
- [61] GAHC (Green Affordable Housing Coalition), Radiant Barrier System, 2005, disponível em <http://www.buiditgreen.org/attachments/wysiwyg/3/Radiant-Barriers.pdf>, consultado em 08-02-2013;
- [62] Kvisla, P., Reflective Insulation – Most Efficient Insulation or too many complications? Dissertação de Mestrado, VIA University College, Dinamarca, 2011;
- [63] Cheikh, Hamida Ben ,Passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates, Renewable Energy, 1877–1886, 2004;
- [64] Akbari, H. Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants, Environmental Pollution, v.116, 119-S126, 2002;
- [65] Peck, S.W., C. Callaghan, B. Bass, and M.E. Kuhn. 1999. *Greenbacks from green roofs: Forging a new industry in Canada*. Ottawa: Canada Mortgage and Housing Corporation;
- [66] Curtis, W.J.R., Le Corbusier: Ideas and forms, Oxford, Paidon Press, 1986;

- [67] Planning Guide, The green roof, 1 fotografia pb 6 ed. Zinco GmbH, Grabenstrabe 33, D – 72669. Alemanha: Unterensingen, 2000c;
- [68] Laar, M. et al, estudo de aplicação de plantas em telhados vivos extensivos em cidades de clima tropical, In: Encontro Nacional de Conforto no ambiente Construído – Encac, 6. Anais, São Pedro, São Paulo: ANTAC, 2001, 1 CD-ROM;
- [69] Jeff Sonne and Danny Parker, Energy Performance Aspects of a Florida Green Roof – part two, Florida Solar Energy Center/University of Central Florida, 2008;
- [70] Wong, N.H. *et al.* , The effects of rooftop garden on energy consumption of a comercial building in Singapore, *Energy and Buildings*, v.35, n.2, 353-364, 2003;
- [71] Wong, N.H. *et al.*, Investigation of termal benefits of rooftop garden in tropical environment, *Building and Environment*, v.38, n.2, 261-270, 2003b;
- [72] Eumorfopoulou, E.; Aranvatinos, D. The contribution of a planted roof to the termal protection of buildings in Greece, *Energy and Buildings*, v.27, n. 4., 29-36, 1998;
- [73] Hodo-Abalo, Samah et al, Performance analysis of a planted roof as a passive cooling technique in hot-humid tropics, *Renewable Energy* 39,140-148, 2012;
- [74] Elzaidabi, Abdalla. A. M., Low Energy, Wind Catcher Assisted Indirect – Evaporative Cooling System for Building Applications, Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, September 2008;
- [75] Zhai, X.Q. et al, A review for the applications of solar chimneys in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 3757 – 3767, 2011;
- [76] Experimental and numerical studies of solar chimney for natural ventilation in Iraq, *Energy and Buildings* 47, 450–457, 2012;

[77] Imteaz, Monzur Alam et al, Rainwater harvesting potential for southwest Nigeria using daily water balance Model, Resources, Conservation and Recycling 62, 51– 55, 2012;

[78] Arkar C., Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building, International Journal of Refrigeration 30,134-143, 2007;

[79] Waqas, Adeel *et al*, Thermal performance of latent heat storage for free cooling of buildings in a dry and hot climate: An experimental study, Energy and Buildings 43, 2621–2630,2011;

[80] Inard, Christian et al, Free-running temperature and potential for free cooling by ventilation: A case study, Energy and Buildings 43, 2705–2711, 2011;

[81] <http://axelgrael.blogspot.pt/2010/07/encalhando-o-barco.html>, consultado em 15-02-2013;

[82]Oliveira, Fedra Tatiana Almeida, Aproveitamento de água pluvial em usos urbanos em Portugal Continental - Simulador para avaliação da viabilidade, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em engenharia do ambiente, Instituto Superior Técnico, 2008;

[83] Araújo, Gregório, Armazenamento de água da chuva para utilização local, dissertação para obtenção do grau de mestre em engenharia do ambiente, Universidade de Aveiro, 2011;

[84] <http://www.graf.pt/Aproveitamentode%C3%81guadaChuva/Conceito/tabid/64/Default.asp>, consultado em 17-02-2013;

[85] Obot., Nsikan I. et al, 22 Years Characterized Trends of Rainfall in Abeokuta, Nigeria, Research Journal of Applied Sciences 6, 264-271, 2011;

[86] <http://aplicweb.feevale.br/site/files/documentos/pdf/23251.pdf>, consultado em 18-02-2013;

[87] Castro, Rui, Uma introdução às energias renováveis: eólica, fotovoltaica e mini-hídrica, ISTpress, 2011;

[88] Bhubaneswari, Paridaa et al, A review of solar photovoltaic Technologies, Renewable and Sustainable energy Reviews, 15, 1625-1636, 2011;

[89] http://beeshadireed.blogspot.pt/2012_06_27_archive.html, consultado em 19-02-2013;

[90] <http://islandenergysystems.wordpress.com/>, consultado em 19-02-2013;

[91] http://www.windfinder.com/windstats/windstatistic_dakar.htm, consultado em 19-02-2013;

[92] <http://acpobservatory.jrc.ec.europa.eu/content/photovoltaic-potential-africa>, consultado em 20-02-2013;

[93] <http://cbe.berkeley.edu/comforttool/>, consultado em 03-04-2013;

[94] Chaves, Flávio; Instalações de climatização e refrigeração, Escola Superior de Tecnologia de Abrantes, 2009-2010;

[95] Roriz, Luis; Climatização – concepção, instalação e condução de sistemas, Edições Orion, 2007;

[96] *DesignBuilder Energyplus Simulation Documentation for DesignBuilder V3.0*, Designbuilder, Pages, 327, 544, 2008-2011;

[97] Lucas, Sandra Manuel Simaria de Oliveira, Argamassas funcionais para uma construção sustentável, tese pra obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 2001;

[98] <http://www.futureeng.pt/pontes-termicas>, consultado em 09-04-2013;

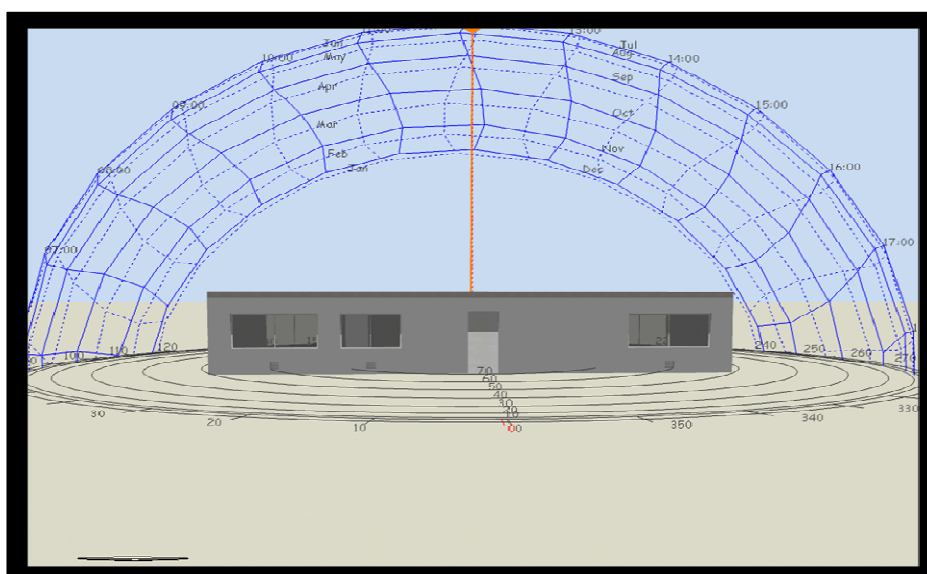
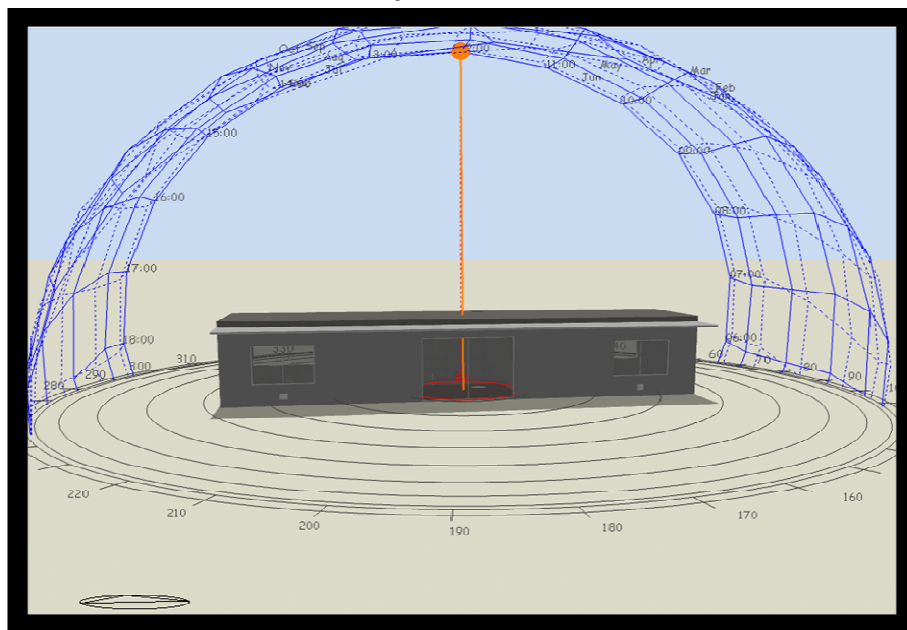
[99] <http://www.futureeng.pt/isolamento-termico>, consultado em 09-04-2013;

[100] http://www.designbuilder.co.uk/helpv2/Content/Mixed_mode.htm, consultado em 26-04-2013;

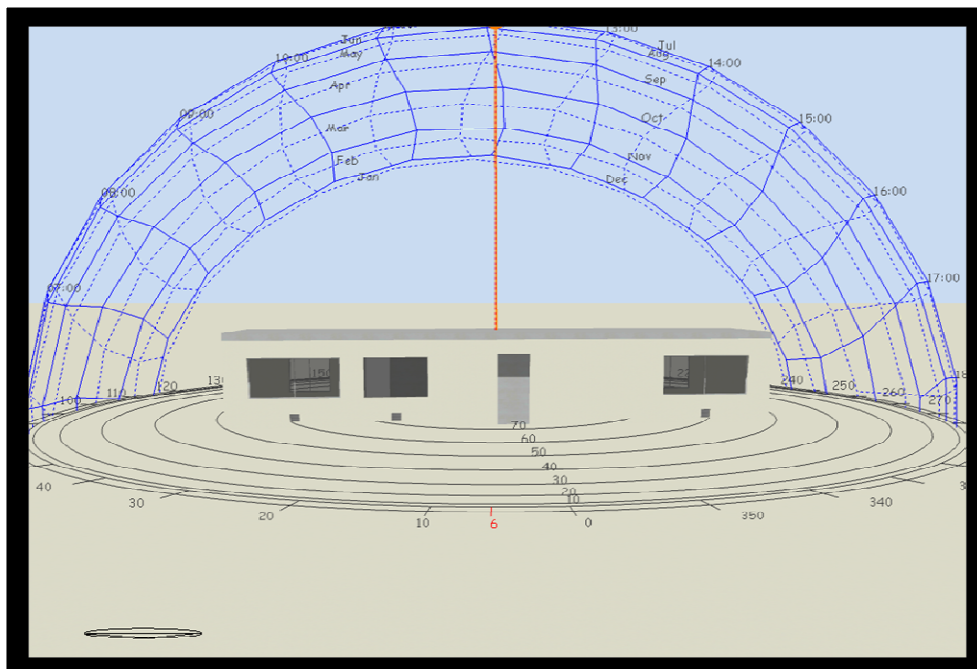
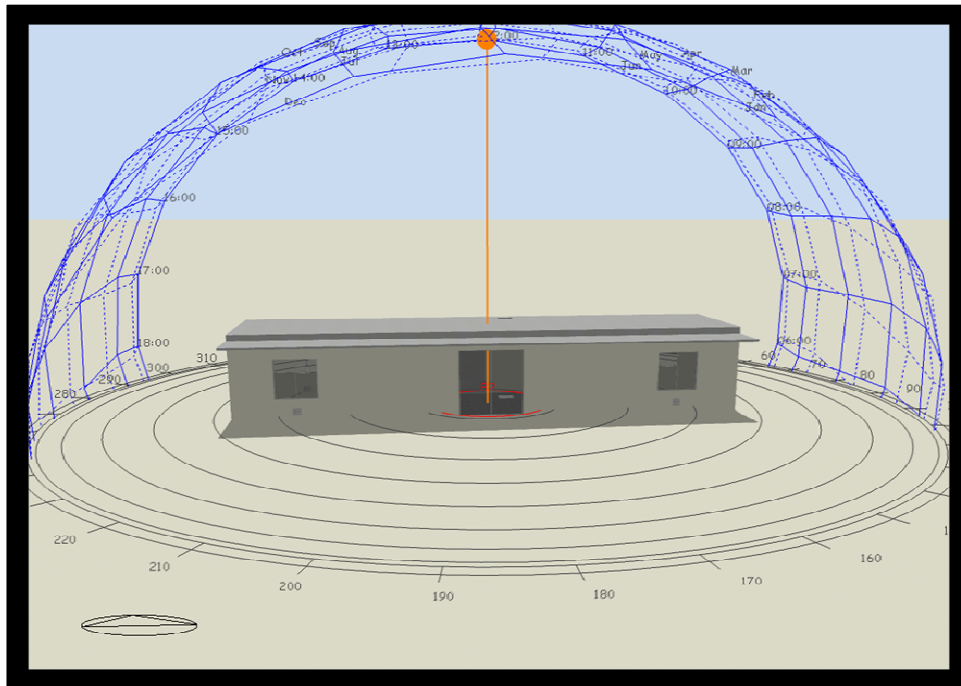
7. Anexos

7.1 Anexo I – Ilustrações do modelo caso de estudo

Ilustrações *DB* da casa referência



Ilustrações DB da casa otimizada (solução proposta)



7.2 Anexo II - Materiais das diversas soluções construtivas

Materiais das soluções construtivas para coberturas		
Cobertura 1	Exterior	Laje de concreto aerado
	2	Perfil estrutural em LSF C150 com isolamento em lã mineral
	3	BioPCM® M182/Q27
	Interior	Placa de reboco
Cobertura 2	Exterior	Laje de concreto aerado
	2	Perfil estrutural em LSF C150 com isolamento em lã mineral
	Interior	Placa de reboco
Cobertura 3	Exterior	Alumínio
	2	Ar (100 mm)
	3	Água
	4	Arenito
	Interior	Betão
Cobertura 4	1	Laje de concreto aerado
Cobertura 5	Exterior	Asfalto
	2	Rolos de lã mineral e lã de vidro
	3	Ar (25mm)
	Interior	Placa de reboco
Cobertura 6	1	Reboco reforçado
Cobertura 7	Exterior	Vegetação
	2	Solo para cultivo argiloso
	3	Polipropileno com fibra de vidro
	4	Cascalho
	5	EPS
	6	Betume/camada de feltro
Cobertura 8	Interior	Aço
	Exterior	Alumínio
	Interior	Poliuretano

Materiais das soluções construtivas para paredes		
Parede 1 M182/Q27	exterior	Adhere Vit Fibras Flex
	2	Reboco reforçado
	3	EPS (Poliestireno expandido)
	4	Perfil estrutural em LSF C150 com isolamento em lã mineral
	5	PCM M182/Q27
	6	Placa de gesso
	interior	Massa de acabamento enduido
Parede 1 M182/Q25	exterior	Adhere Vit Fibras Flex
	2	Reboco reforçado
	3	EPS (Poliestireno expandido)
	4	Perfil estrutural em LSF C150 com isolamento em lã mineral
	5	PCM M182/Q25
	6	Placa de gesso
	interior	Massa de acabamento enduido
Parede 1 M182/Q23	exterior	Adhere Vit Fibras Flex
	2	Reboco reforçado
	3	EPS (Poliestireno expandido)
	4	Perfil estrutural em LSF C150 com isolamento em lã mineral
	5	PCM M182/Q23
	6	Placa de gesso
	interior	Massa de acabamento enduido
Parede 2	exterior	Adhere Vit Fibras Flex
	2	Reboco reforçado
	3	EPS (Poliestireno expandido)
	4	Perfil estrutural em LSF C150 com isolamento em lã mineral
	5	Tela Imperipact
	6	Reboco reforçado
	interior	Massa de acabamento enduido
Parede 3	exterior	Adhere Vit Fibras Flex
	2	Reboco reforçado
	3	EPS (Poliestireno expandido)
	4	Perfil estrutural em LSF C150 com isolamento em lã mineral
	5	Placa de gesso
	interior	Massa de acabamento enduido
Parede 4	exterior	Adhere Vit Fibras Flex
	2	Reboco reforçado
	3	EPS (Poliestireno expandido)
	4	Perfil estrutural em LSF C150 com isolamento em lã mineral
	5	Wallmate
	6	Placa de gesso
	interior	Massa de acabamento enduido
Parede 5	exterior	Folha exterior em alvenaria
	2	Perfil estrutural em LSF C150 com isolamento em lã mineral
	3	Betão alta densidade
	interior	Reboco de gesso
Parede 6	exterior	Aço
	2	Lã rocha
	interior	Aço
Parede 7	exterior	Papelão
	2	Fibra de vidro
	interior	Placa de gesso
Parede 8	exterior	Aço
	2	Água
	interior	Aço

Materiais das soluções construtivas para pavimentos		
Pavimento 1	Exterior	Espuma de formaldeído de ureia
	2	Betão
	3	Betonilha
	Interior	Piso de madeira
Pavimento 2	Exterior	Espuma de formaldeído de ureia
	2	Betão reforçado (com 2% de aço)
	3	Betão leve seco
	Interior	Mosaicos de cerâmica
Pavimento 3	Exterior	EPS
	2	Argamassa
	Interior	Cerâmica vidrada
Pavimento 4	Exterior	EPS
	2	Argamassa
	Interior	Cerâmica vidrada
Pavimento 5	Exterior	EPS
	2	Argamassa
	Interior	Cobertura em poliolefina reticulada
Pavimento 6	Exterior	EPS
	2	Argamassa
	Interior	Blocos de pavimentação
Pavimento 7	Exterior	Espuma de formaldeído de ureia
	2	Reboco reforçado
	Interior	Mosaicos de cerâmica
Pavimento 8	1	Betão reforçado (com 2% de aço)
Pavimento 9	Exterior	Betão
	Interior	Piso de madeira

Soluções para envidraçados	
1	Dbl Blue 6mm/6mm ar
2	Dbl Clr 6mm/6mm ar
3	Dbl Elec Abs Colored 6mm/6mm Ar
4	Dbl green 6mm/6mm Ar
5	Dbl grey 6mm/6mm Ar
6	Dbl Clr low iron 3 mm/13 mm ar
7	Dbl LoE (e2=.1) Clr 6mm/13mm Ar
8	Dbl LoE (e2=.1) Clr 3mm/13mm Arg
9	Project external glazing (PYR B clear 3mm/air 13mm/generic clear 3mm
10	Dbl LoE Elec Abs Colored 6mm/6mm ar
11	Dbl LoE Spec Sel Clr 6mm/6mm ar
12	Dbl Ref-A-H Clr 6mm/6mm Air
13	Dbl Ref-A-L Clr 6mm/6mm Air
14	Trp LoE(e2=e5=0.1) Clr 3mm/13mm Arg
15	Sgl Clr 6mm
16	Sgl LoE (e2=0.2) Clr 6mm
17	Dbl LoE (e3=.1) Clr 3mm/6mm Ar